

VŠB – Technická univerzita Ostrava
Fakulta elektrotechniky a informatiky
Katedra kybernetiky a biomedicínského inženýrství

Návrh a realizace modelu robotu pro ověření jakosti průmyslového řídicího systému

Design and Realization of a Robot Model for Verification of Quality of Industrial Control System

Zadání diplomové práce

Student:

Bc. Ondřej Petr

Studijní program:

N2649 Elektrotechnika

Studijní obor:

2612T041 Řídicí a informační systémy

Téma:

Návrh a realizace modelu robotu pro ověření jakosti průmyslového
řídícího systému
Design and Realization of a Robot Model for Verification of Quality
of Industrial Control System

Jazyk vypracování:

čeština

Zásady pro vypracování:

1. Analýza problematiky řízení sériových kinematik se zaměřením na paletizační roboty.
2. Seznámení se s řídicími prostředky B&R.
3. Rozbor možností posuzování jakosti řízení u robotických systémů.
4. Návrh konstrukčního řešení a sestavení modelu paletizačního robotu tak, aby jednotlivé díly bylo možné realizovat pomocí 3D tisku.
5. Návrh a realizace řízení vytvořeného modelu obsahující jednoduché řízení bez omezení akcelerace, jednoduché řízení s omezením akcelerace bez interpolace vzájemné polohy os, pokročilé řízení s použitím technologií B&R s interpolací.
6. Realizace měření vybraných ukazatelů jakosti řízení pohybu.
7. Zhodnocení řešení a porovnání jednotlivých metod řízení.

Seznam doporučené odborné literatury:

- [1] ČSN EN ISO 10218. *Roboty a robotická zařízení - Požadavky na bezpečnost průmyslových robotů*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2012.
- [2] Technická literatura firmy B&R.

Formální náležitosti a rozsah diplomové práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

Vedoucí diplomové práce: **doc. Ing. Jiří Koziorek, Ph.D.**

Datum zadání: 01.09.2019

Datum odevzdání: 30.04.2020



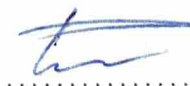
doc. Ing. Jiří Koziorek, Ph.D.
vedoucí katedry



prof. Ing. Pavel Brandštetter, CSc.
děkan fakulty

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci vypracoval samostatně. Uvedl jsem všechny literární
prameny a publikace, ze kterých jsem čerpal.

V Ostravě 15. května 2020



.....

Velmi rád bych na tomto místě poděkoval zaměstnancům brněnského sídla firmy B&R, jelikož pro mě vytvořili velmi přátelskou atmosféru a byli velmi nápomocní při řešení výzev, se kterými jsem si sám nevěděl rady . Zejména bych chtěl poděkovat panu Ing.Václavovi Velebovi, který byl mým konzultantem, za velikou trpělivost a ochotu od započetí až po dokončení práce. Taktéž nesmím opomenout mou rodinu a přítelkyni, kteří mě podporovali i během těžkých chvil, kterých bylo nespočet.

Abstrakt

Tato práce se zabývá porovnáním parametrů jakosti tří způsobů řízení na navrženém paletizačním robotu vytištěném pomocí technologie 3D tisku. Teoretický návrh systému se zprvu zabývá seznámením se sériovou kinematikou a jejími vlastnostmi, dále pokračuje rešeršní prací řídicích systémů firmy B&R zaměřenou hlavně na výběr vhodných komponent pro celý systém paletizačního robotu a končí seznámením s parametry jakosti řízení dle normy ČSN EN ISO 9283. Praktický návrh se zabývá kompletní tvorbou komponent paletizačního robotu v SW Fusion 360 a jejich následnou realizací 3D tiskárnou Prusa i3 MK3S. Řízení robotu je realizováno třemi způsoby bez omezení kacerace RAMP módem, s omezením akceleraace bez interpolace vzájemné polohy os knihovnou Motorky a pokročilým řízením využívající technologií B&R s interpolací vzájemné polohy os SW balíkem mapp Motion, který nově podporuje krokové motory od verze 5.9. Měření jakosti jednotlivých řízení se zabývá sběrem a vyhodnocením dat z měření opakovatelnosti polohy efektoru robotu, změny akceleraace během pohybového cyklu robotu, oteplení motorů os při zahřívacím cyklu robotu, oteplení motorů os při cyklickém pohybu robotu a také dobu trvání každého jednotlivého cyklu. V závěru je zhodnocen postup návrhu od počátku až po výsledná naměřená data. Je potřeba podotknout, že sestavený systém je prvním paletizačním robotem s krokovými motory řízený SW balíkem mapp Motion od firmy B&R.

Klíčová slova: Paletizační robot, 3D tisk, Interpolace, mapp Motion, Jakost pohybu

Abstract

This thesis deals with the comparison of quality parameters of three control methods on a designed palletizing robot made by 3D printing. The theoretical design of the system first deals with serial kinematics and its properties, then continues with the research of B&R control systems focused mainly on the selection of suitable components for the entire palletizing robot system and ends with control quality parameters according to ČSN EN ISO 9283. Practical design deals with the proces of making palletizing robot components in SW Fusion 360 and their realization by a 3D printer Prusa i3 MK3S. The robot is controlled in three ways, without acceeration limitation by RAMP mode, with acceleration limitation without interpolation of axis position by the Motorky library and advanced control using B&R technology with interpolation of axis position by SW package mapp Motion, which newly supports stepper motors from version 5.9. The measurement of the quality of individual controls deals with the collection and evaluation of data from measuring the repeatability of the position of the robot effector, changes in acceleration during the robot motion cycle, temperature of axis motors during robot heating cycle, temperature of axis motors during cyclic robot movement and also time duration of each individual cycle. In the end, the design process is evaluated from the beginning to the resulting measured data. It should be noted that the assembled system is the first palletizing robot with stepper motors controlled by the mapp Motion package from B&R.

Keywords: Paletizing robot, 3D print, Interpolation, mapp Motion, Quality of movement

Obsah

Seznam použitých zkratk a symbolů	8
Seznam obrázků	10
Seznam tabulek	12
Seznam výpisů zdrojového kódu	13
1 Úvod	14
2 Analýza problematiky řízení sériových kinematik se zaměřením na paletizační roboty	15
2.1 Paletizační sériový robot	15
2.2 Sériová kinematika	15
2.3 Paralelní kinematika	17
2.4 Srovnání sériové a paralelní kinematiky	17
2.5 Pohyb a výpočet trasy	19
3 Rozbor a výběr prostředků řízení B&R	21
3.1 Procesorový modul	21
3.2 Moduly řízení motorů	25
3.3 Krokové motory	28
3.4 Napájecí zdroj	31
3.5 Finální konfigurace systému řízení tříosého paletizéru	32
4 Rozbor možností posuzování jakosti řízení u robotického systému	35
4.1 Zkušební podmínky	35
4.2 Parametry polohy	38
4.3 Parametry dráhy	40
5 Návrh a realizace modelu pomocí 3D tisku	42
5.1 Prostředky pro návrh a realizaci modelu robotu	42
5.2 Konstrukční část paletizačního robotu	43
6 Návrh a realizace řízení	52
6.1 Řízení bez omezení akceleraace bez interpolace	52
6.2 Řízení s omezením akceleraace bez interpolace	57
6.3 Řízení s omezením akceleraace s interpolací	60

7	Realizace měření vybraných ukazatelů jakosti řízení pohybu	67
7.1	Zkušební podmínky	67
7.2	Opakovatelnost polohy robotu	69
7.3	Změna akcelerace při pohybu	74
7.4	Doba cyklu	77
7.5	Oteplení motorů při zapnutém napájení	80
7.6	Oteplení motorů při pohybu	81
8	Zhodnocení řešení a porovnání jednotlivých metod řízení	85
	Literatura	89
	Přílohy	92
A	Seznam příloh	92

Seznam použitých zkratk a symbolů

ABR	– Average Bitrate
APC	– Automation Personal Computer
ARM	– Advanced RISC Machine
CNC	– Computer Numerical Control
CPU	– Central Processing Unit
DDE	– DynamicData Exchange
DDR	– Double Data Rate
DIN	– Deutsches Institut für Normung
DPI	– Dots per Inch
DS	– Digital Signal
DVD	– Digital Versatile Disk
ESP	– Espressif
FDM	– Fused deposition modeling
HDD	– Hard Disk Drive
HMI	– Human Machine Interface
HW	– Hardware
IDE	– Integrated Development Enviroment
IoT	– Internet of Things
IP	– Internet Protocol
LED	– Light Emitting Diode
MCS	– Machine Coordinate System
NEMA	– National Electrical Manufacturers Association
OPC UA	– Open Platform Communication Unified Architecture
PC	– Personal Computer
PCI	– Peripheral Component Interconnect
PCIe	– Peripheral Component Interconnect express
PEI	– Polyetherimide
PETG	– Polyethylene terephthalate
PLA	– Polyatic acid
PVI	– Process Visualization Interface
RAM	– Random Access Momory
SCL	– Serial clock
SDA	– Serial data
SDC	– Smart Device Controller
SM	– Stepper Motor
SSD	– Solid State Drive

SSI	– Synchronous Serial Interface
STL	– Stereolithography
STO	– Safe Torgue Off
SW	– Software
TCP	– Tool Center Point
TPU	– Thermoplastic polyurethane
USB	– Universal Serial Bus
WiFi	– Wireless Fidelity
XML	– Extensible Markup Language

Seznam obrázků

1	Otevřený kinematický řetězec	16
2	Zobrazení geometrie podle Denavit-Hartenbergerovy úmluvy[6]	17
3	Uzavřený kinematický řetězec	18
4	Výpočetní řetězec pohybu	19
5	Graf systémových souřadnic	19
6	Graf souřadnic os	20
7	Graf navzorkovaných souřadnic os	20
8	APC910 šasi[9]	22
9	Procesorový modul X20CP1586[10]	23
10	Kompaktní procesorový modul X20CP0484[11]	25
11	ACOPOSmicro pro řízení krokových motorů s enkodéry[12]	26
12	X20SM1446-1 karta pro řízení krokových motorů[13]	27
13	Krokový motor 80MPD5.300S000-01[14]	29
14	Fázorový diagram režimu celých kroků, a) bez redukce proudu b) s redukcí proudu [14]	29
15	Fázorový diagram režimů půl krokování, a) způsob 1 b) způsob 2 [14]	30
16	Fázorový diagram režimu mikro krokování [14]	30
17	HW konfigurace finální reálné konfigurace systému	32
18	Logické schéma finální HW konfigurace	33
19	Pracovní prostor roboru Fanuc M-410iC/110 s vyznačenou zkušební krychlí[17]	37
20	Umístění zápěstí a středového bodu efektoru robotu	37
21	Znázornění stabilizace polohy s mezním pásmem[16]	39
22	Znázornění rohových odchylek	41
23	Postup pro vytvoření fyzicky hmatatelného modelu pomocí 3D tisku	42
24	Comau PAL 260 s barevně odlišenými osami a jim příslušícím částem	44
25	Skica navržené základny: a) Pohled shora, b) Pohled zepředu, c) Pohled zleva	45
26	Skica navrženého podstavce	45
27	Navržené axiální ložisko. Vlevo skica, vpravo reálný tisk vsazený do podstavce	46
28	Navržené rameno pro osu Q_2 . Nahoře viditelné místo pro ocelovou hvězdu, dole viditelné místo pro uložení ložiska.	47
29	Navržené táhlo osy Q_3	47
30	Navržená skica horizontálního ramene (předloktí) robotu nahoře a pomocná tyč dole	48
31	Navržená skica zápěstí (vlevo) a efektoru (vpravo)	49
32	Stabilizační pomocné tyče a trojúhelníkový přenašeč	49
33	Skica vložky (vlevo), vsazená nylon-karbonová vložka v rameni robotu (vpravo)	50
34	Uzávěr základny	51

35	Rychlostní profil režimu Ramp	52
36	Stavový diagram karty X20SM1446-1	54
37	Stavový diagram programu Ramp	57
38	Vstupy a výstupy funkčního bloku SM	59
39	Stavový diagram programu s využitím funkčního bloku SM	60
40	Řetězec konfigurace mapp Robotics	62
41	Translace jednotlivých os mechanického systému	63
42	Vzhled webové aplikace mapp Cockpit	64
43	Stavový diagram finální aplikace mapp Motion	65
44	Sestava robotu připravená pro měření	68
45	Měřicí řetězec opakovatelnosti měření	69
46	Detail dotyku efektoru na rezistivní vrstvu se zaznamenanými souřadnicemi	70
47	Vzhled aplikace pro sběr a ukládání dat v programu MS Excel	71
48	Výsledek měření opakovatelnosti polohy řízení RAMP v pixelech	72
49	Výsledek měření opakovatelnosti polohy řízení RAMP v milimetrech	72
50	Výsledek měření opakovatelnosti polohy řízení Motorky v pixelech	73
51	Výsledek měření opakovatelnosti polohy řízení Motorky v milimetrech	73
52	Výsledek měření opakovatelnosti polohy řízení mappMotion v pixelech	74
53	Výsledek měření opakovatelnosti polohy řízení mappMotion v milimetrech	74
54	Měřicí řetězec změny akcelerace při pohybu	75
55	Upevnění senzoru MPU9250 a vývojové desky DevKit v1 s procesorem ESP-32	75
56	Graf akcelerace ve směru osy X	76
57	Graf akcelerace ve směru osy Y	77
58	Graf akcelerace ve směru osy Z	77
59	Graf úhlového zrychlení okolo osy X	77
60	Graf úhlového zrychlení okolo osy Y	78
61	Graf úhlového zrychlení okolo osy Z	78
62	Graf úhlového zrychlení okolo osy Z	78
63	Měřicí řetězec doby cyklu	79
64	Měřicí řetězec oteplení motorů	80
65	Detail uložení senzorů na krokových motorech	81
66	Graf oteplení motorů při řízení RAMP	82
67	Graf oteplení motorů při řízení komponentou Motorky	82
68	Graf oteplení motorů při řízení komponentou mapp Motion	82
69	Graf oteplení motorů při řízení RAMP	83
70	Graf oteplení motorů při řízení komponentou Motorky	83
71	Graf oteplení motorů při řízení komponentou mapp Motion	84

Seznam tabulek

1	Porovnání parametrů člověka a paletizačního robotu.	15
2	Porovnání parametrů sériové a paralelní kinematiky[7].	18
3	Možné moduly základních desek pro APC910 a jejich procesory	23
4	Parametry procesoru X20CP1586	24
5	Základní parametry ACOPOSmicro 80SD100XS.C04X-01	26
6	Základní parametry karty X20SM1446-1	28
7	Velikosti krokových motorů firmy B&R[14]	30
8	Parametry vybraných motorů	31
9	Výkon jednotlivých komponent systému při 24V	31
10	Shrnutí konfigurace systému řízení tříosého paletizéru.	34
11	Parametry tiskárny Prusa i3 MK3s	43
12	Nastavené proudy pro motory jednotlivých os konfigurace RAMP	53
13	Nastavené limity rychlosti a zrychlení	53
14	Status word	55
15	Control word	56
16	Nastavené proudy pro motory jednotlivých os konfigurace Motorky	58
17	Nastavené proudy pro motory jednotlivých os konfigurace mapp Motion	61
18	Body dráhy pohybu	69
19	Průměrná doba cyklu	80

Seznam výpisů zdrojového kódu

1	Ukázka jazyku G-Code pro pohyb robotu	66
---	-------------------------------------------------	----

1 Úvod

Úlohou práce je návrh a realizace řízení paletizačního robota s krokovými motory sestaveného pomocí 3D tisku a následný sběr a vyhodnocení dat z měření jakosti robotického systému při třech způsobech řízení. První způsob je řízení bez omezení akcelerace v režimu RAMP, druhý způsob s omezením akcelerace bez interpolace vzájemné polohy os s knihovnou Motorky a třetím způsobem je pokročilé řízení využívající technologií B&R, zejména SW balík mapp Motion.

Průmyslové roboty jsou v automatizovaných procesech velmi nákladnou investicí, která je pro mnohé společnosti nedostupná. Je snahou tedy nalézt řešení, které by tento problém vyřešilo a zároveň umožnilo široké spektrum modifikací pro specifické aplikace. Paletizační robot je často používán pro manipulaci s těžkými předměty a jeho úkolem je ukládat organizovaně tato břemena na předem určené místo. Ovšem existují aplikace, které nepožadují vysokou nosnost robota a nepotřebují několikametrový dosah ramene.

Nenáročné aplikace tedy mohou využít jednoznačně konstrukce robota vyrobeného na 3D tiskárně, jelikož právě tato technologie je cílená na prototypovou a nízkonákladovou výrobu. Takto vyrobeného robota je možno, s patřičnou znalostí dané kinematiky, snadno modifikovat a vyhovět tak například aplikacím s limitací pracovního prostoru. Využití krokových motorů se rovněž nabízí pro tento typ aplikací, jelikož jejich vysoký moment při nízkých otáčkách dokáže se správnou konfigurací mechanických součástí bez problému pohybovat vytištěným robotem. Jejich výkon je velmi přijatelný, přesnost těchto motorů se pohybuje v setinách stupňů při režimu mikrokrokování a taktéž je možné využít populárního hledání nulového bodu systému bez použití senzoru, které využívá pouze informaci o aktuálním momentu motoru.

Hlavním cílem práce je návrh robotického systému, splňující výše uvedené vlastnosti, jehož řízení bude realizováno třemi způsoby. Porovnání kvality řízení každého ze způsobů je provedeno pomocí měření pěti parametrů jakosti pohybu robota. Opakovatelnost polohy udává přesnost daného řízení, změna akcelerace při pohybu mapuje profil a oscilace robota v jednotlivých bodech pohybového cyklu, oteplení os motoru při zahřívacím procesu poukazuje na vlastnosti řízení pracovat s efektivním využitím proudu vinutím motoru, podobně jako měření oteplení motorů os při pohybu a poslední z měření porovnává dobu trvání každého cyklu.

Práce je sestavena ze sedmi kapitol. První je věnována analýze problematiky řízení sériových kinematik, druhá se zabývá rozbořem a výběrem prostředků řízení od firmy B&R a třetí rozebírá možnosti posuzování jakosti řízení. K těmto čistě teoretickým kapitolám je snahou najít praktické využití, proto je čerpáno z informací nabytých při návštěvě 61. Mezinárodního strojírenského veletrhu nebo z 7 měsíční stáže u firmy B&R. Další kapitoly se věnují návrhu a realizaci modelu pomocí 3D tisku, návrhem a realizací řízení a následně realizací měření vybraných ukazatelů jakosti pohybu. Tvorba těchto praktických kapitol byla konzultována s odborníky na danou problematiku z řad firmy B&R. Poslední kapitolou je zhodnocení a porovnání jednotlivých metod řízení, která shrnuje celý průběh práce do stručného textu, vyzdvihuje praktické metody použité při řešení práce a poukazuje na výsledky jednotlivých měření.

2 Analýza problematiky řízení sériových kinematik se zaměřením na paletizační roboty

Tato kapitola se zabývá vysvětlením funkcionality sériového paletizačního robotu, jeho základními rysy a vlastnostmi. Dále rozebírá sériovou kinematiku, srovnává ji s paralelní a vysvětluje jednotlivé možnosti řízení robotu pomocí této kinematiky. Závěrem je vysvětlena funkcionality plánování pohybu pomocí komponenty mapp Motion. Informace čerpány z knihy[1] zabývající se problematikou modelování, identifikací a řízením robotů.

2.1 Paletizační sériový robot

Paletizace je činnost, při které jsou předměty skládány na paletu pro usnadnění jejich přepravy. Ve většině provozů tuto činnost zastává člověk, který ovšem není přizpůsoben tomu, aby tuto náročnou práci mohl vykonávat nepřetržitě celou pracovní dobu. Paletizace je jednotvárná a náročná, jak fyzicky tak psychicky a často velmi omezena nosností člověka, proto jsou ve výrobním procesu nahrazovány tyto pozice paletizačními roboty. Srovnání parametrů člověka a paletizačního robotu je znázorněno v tabulce č.1. Data byla čerpána z dokumentace[2] k robotu ABB IRB 660-250/3,15 a z hygienických hmotnostních limitů pro práci člověka s břemeny[3].

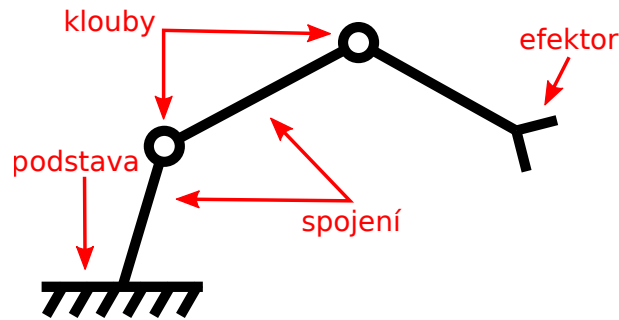
Tabulka 1: Porovnání parametrů člověka a paletizačního robotu.

Parametr	Muž	Žena	ABB IRB660-250/3,15
Maximální nosnost	50kg	20kg	250Kg
Maximální nosnost za 8h	10000kg	6500kg	2720000kg
Počet cyklů za hodinu	25 (při 50kg)	40,61 (při 20kg)	1360
Dosah ramene z místa	63.5cm (průměr)		315cm
Stupeň krytí	Nemá		IP67

2.2 Sériová kinematika

Prvním průmyslovým robotem byl Unimate využívající právě tuto kinematiku s rotačními a posuvnými klouby. Dnes se roboty s touto kinematikou používají k svařování, nástřikům, manipulaci s břemeny a mnohým dalším aplikacím.

Obecně se sériový kinematický řetězec skládá z fixní podstavy robotu a série spojů s klouby, které jsou zakončeny efektozem ve volném prostoru. Jednotlivé spoje mezi klouby jsou pro jednoduchost uváděny jako tuhá tělesa, na která nepůsobí vnější síly, které by měly vliv na výslednou polohu efektozu. Klouby mohou být rotační nebo posuvné s ideální konstrukcí vykazující nulovou elasticitu a vůli v převodech. Pokud je použit složitý kloub, je na něj pohlíženo jako na sestavu z otočných a posuvných kloubů, které mezi sebou mají spojení o nulové délce. Této sestavě výše jmenovaných prvků se říká otevřený kinematický řetězec, který je znázorněn na obrázku č.1.



Obrázek 1: Otevřený kinematický řetězec

2.2.1 Přímá a inverzní kinematika

Při řízení robotického systému vznikají problémy s výpočtem polohy efektoru a výpočtem polohy jednotlivých kloubů. Řešením je použití přímé nebo inverzní kinematiky, jejichž výpočet je poměrně složitou záležitostí a nemá jednotnou podobu. Podrobnější informace dostupné v knize[4] věnované této tématice.

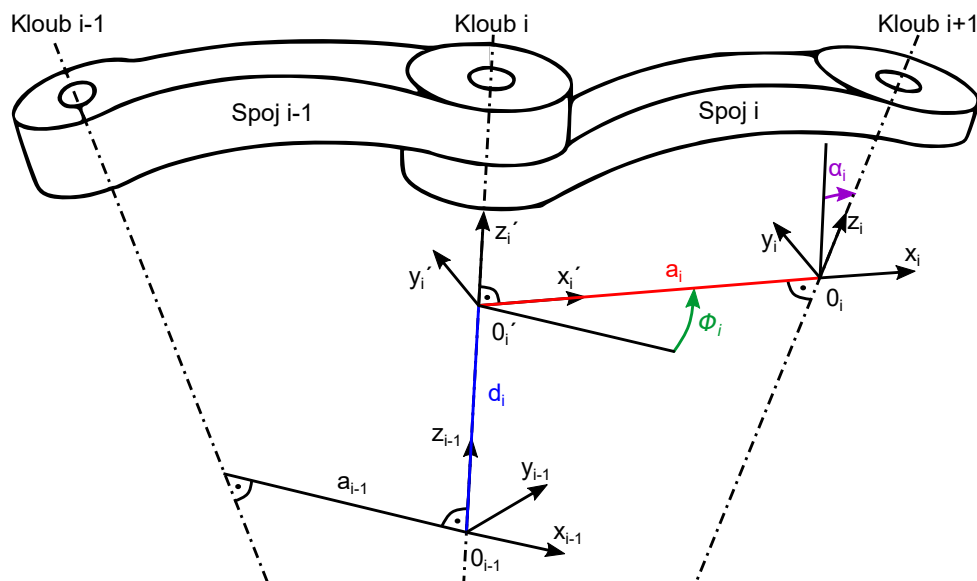
- **Přímá kinematika:** Je znám úhel natočení jednotlivých kloubů z čehož lze vypočítat pozici efektoru v prostoru. Je dáno, že při stejném natočení kloubů je dosaženo vždy stejného bodu v prostoru
- **Inverzní kinematika:** Je známa pozice efektoru v prostoru, pro kterou je potřeba zjistit možné úhly natočení jednotlivých kloubů. Je dáno, že při dosažení jednoho bodu v prostoru může být každý kloub natočen pokaždé jinak

2.2.2 Denavit-Hartenbergerovy parametry

Pro zjednodušení výpočtu byla zavedena Denavit-Hartenbergerova úmluva definující zápis geometrie sériových manipulátorů. Každý kloub a spoj má určitou polohu v prostoru s nějakým počátkem O a osami x , y , z . Směry těchto os musí být určeny vždy stejným způsobem, aby bylo možné využít čtyři parametry definované úmluvou. Grafické znázornění poloh jednotlivých os souřadnicových systémů je na obrázku 2. Informace čerpány z knihy[5].

Postup určení směru os pro spojení pomocí rotačních kloubů:

1. Osa z_i je určena podél osy rotačního kloubu i .
2. Počátek O_i je umístěn v průsečíku osy z_i a normály os z_{i-1} a z_i . Počátek O_i' je umístěn v průsečíku osy z_{i-1} a téže normály
3. Zvol x_i a x_i' ve směru od kloubu i do $i+1$
4. Zvol y_i a y_i' pomocí pravidla pravé ruky, aby byly souřadnicové systémy pravotočivé



Obrázek 2: Zobrazení geometrie podle Denavit-Hartenbergerovy úmluvy[6]

Jakmile jsou souřadnicové systémy správně sestaveny, je možné mezi nimi určit čtyři parametry, které jsou barevně znázorněny na obrázku č. 2.

- a_i ... vzdálenost mezi počátky O_i a O'_i
- d_i ... vzdálenost mezi počátky O_{i-1} a O'_i
- α_i ... úhel mezi osami z_{i-1} a z_i daný pootočením souřadnicového systému kolem osy x'_i
- Θ_i ... úhel mezi osami x_{i-1} a x_i daný pootočením souřadnicového systému kolem osy z_{i-1}

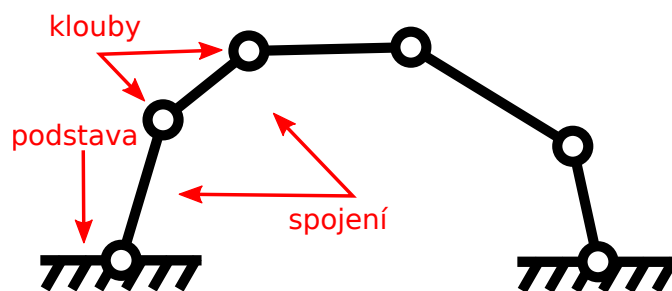
2.3 Paralelní kinematika

Roboty s touto strukturou se začaly používat pro účely leteckých simulátorů, díky jejich vysoké akceleraci. Konstrukčně jsou řešeny pomocí identických paralelních řetězců, takzvaných nohou, fixně spojenými s podstavou. Druhou stranu mají spojenou s platformou, která zastává funkci efektoru. Pohyb plošiny bývá většinou zajištěn pomocí posuvných kloubů, které zkracují nebo prodlužují každou z nohou platformy. Celý koncept je založen na uzavřeném kinematickém řetězci, který je vyobrazen na obrázku č.3.

Lineární posuvné klouby využívá například Stewardova plošina. Existují paralelní roboty s rotačními klouby, takzvané Delta roboty, dnes hojně používané v průmyslu pro vysokorychlostní aplikace.

2.4 Srovnání sériové a paralelní kinematiky

Srovnání dvou kinematik, kdy každá má své místo v průmyslovém procesu a navzájem se kombinují a doplňují, je velmi složité. Nelze jednoznačně určit, která z kinematik je lepší, jelikož



Obrázek 3: Uzavřený kinematický řetězec

záleží na spoustě faktorů, které musí být brány v potaz. Mezi tyto faktory patří oblast použití, pracovní prostor, přesnost, rychlost, bezpečnost, univerzálnost a dnes čím dál více schopnost kolaborace s člověkem. Srovnání je proto provedeno velmi obecně pomocí tabulky č.2.

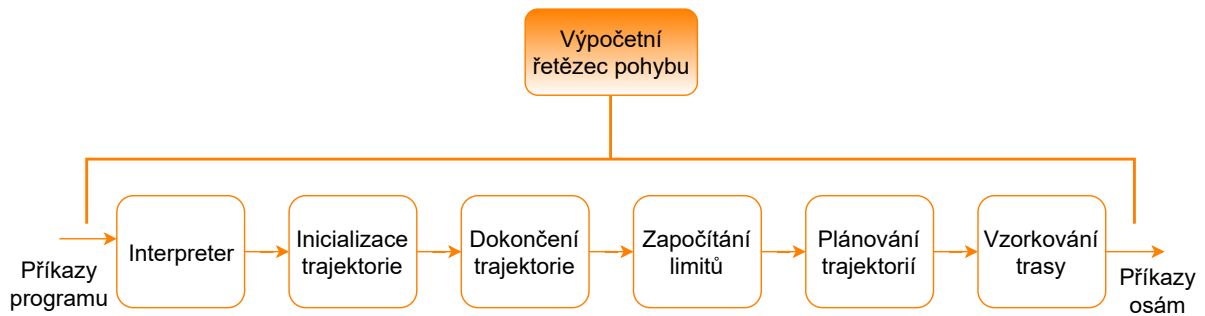
Tabulka 2: Porovnání parametrů sériové a paralelní kinematiky[7].

Parametr	Sériová kinematika	Paralelní kinematika
Pracovní prostor	Velký	Malý a složitý
Přímá kinematika	Jednoduchá	Velmi složitá
Inverzní kinematika	Složitá	Jednoduchá
Chyba polohy	Sčítá se	Průměrná
Maximální síla	Záleží na nejslabším akčním prvku řetězce	Součet všech akčních prvků řetězce
Tuhost	Malá	Velká
Dynamické vlastnosti	Slabší s rostoucími rozměry	Velmi dobré
Setrvačnost	Velká	Malá
Univerzálnost	Velká	Malá
Poměr nosnosti a váhy	Malá	Velká
Rychlost a akcelerace	Malá	Velká
Přesnost	Malá	Velká
Poměr pracovního prostoru a velikosti robotu	Velká	Malá

Podle tabulky č.2 lze říci, že sériová kinematika jednoznačně zaostává za paralelní, což ovšem není úplně pravda. Velkou nevýhodou paralelní kinematiky je omezenost velikosti pracovního prostoru, která je dána konstrukcí robotu. V malém prostoru je schopen se pohybovat mrštně a dosahovat velkých přesností i v různorodém prostředí oproti sériové kinematice. Chyba polohy je dána rozdílem mezi žádanou a dosaženou polohou, což je problém u sériových kinematik, které mají za sebou nejčastěji šest kloubů, ve kterých mohou vznikat vůle v ozubech převodů, nepřesností výroby a podobně. Tato chyba se tedy v celém sériovém řetězci sčítá a výsledek je poté velmi odlišný od paralelní kinematiky. Univerzálnost robotu v průmyslovém procesu je důležitý parametr, pokud je například potřeba nejprve manipulovat s předmětem a poté jej svařit. Právě pro tento parametr jsou často sériové kinematiky voleny do průmyslových procesů.

2.5 Pohyb a výpočet trasy

Jednoduché osově systémy není složité řídit a předpokládat, jakým směrem se bude jejich pohyb ubírat. Rostoucí počet os v systému zkomplikuje řízení, zároveň je potřeba správně plánovat trasu. Komponenta mapp Motion použita v jednom ze způsobů řízení v této práci, má implementováno plánování pohybu pro systémy s více osami. V principu jsou osám cyklicky posílány příkazy vycházející z programu, které jsou upravovány pomocí výpočetního řetězce zobrazeném na obrázku č.4. Každý příkaz k pohybu projde tímto řetězcem, který se skládá z bloků, které jsou řazeny sériově a postupně formují příkaz pro pohyb osami. Použité informace vycházejí z výukových materiálů[8] pro práci s mapp Motion.



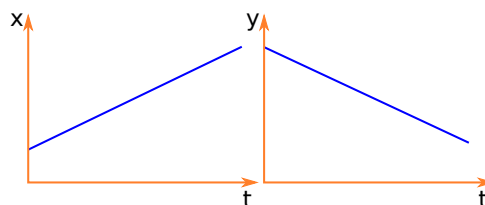
Obrázek 4: Výpočetní řetězec pohybu

2.5.1 Interpreter

Práce tohoto bloku je překlad programu z psané podoby, které s jistou znalostí rozumí člověk na tzv. Motion Packets (Instrukční pakety), které se používají pro zpracování v dalších částech řetězce. Syntaxe psaného kódu mohou být různé a příkazy mohou být předávány například pomocí G-code, strukturovaného textu (IEC-ST) a podobně. Interpreter může být konfigurován pomocí XML souborů pro případy, kdy je využito dialektů ve zvoleném jazyce.

2.5.2 Inicializace geometrie trajektorie

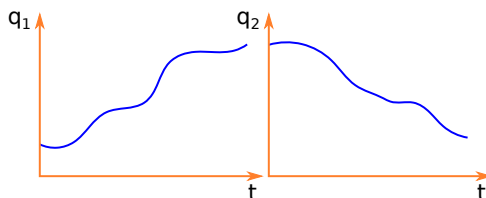
V tomto bodě je vytvořena trajektorie z příkazů přeložených interpreterem, ta je pouze v kartézských souřadnicích, podle kterých není možný pohyb os v reálném prostoru. Graf je znázorněn na obrázku č.5.



Obrázek 5: Graf systémových souřadnic

2.5.3 Dokončení trajektorie

Z vytvořených tras v kartézském prostoru jsou vypočítány reálné pohyby jednotlivých os. V tomto bodě se započítává použitá kinematika a rozměry nástroje. Graf je znázorněn na obrázku č.6.



Obrázek 6: Graf souřadnic os

2.5.4 Započítání limitů

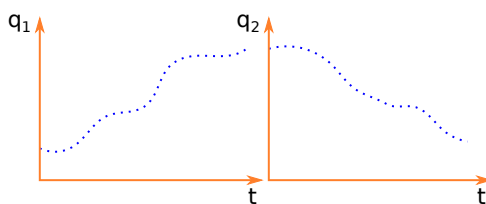
Uživatelé zvolené limity ryvu, akcelerace a rychlosti jsou přiřazeny jednotlivým elementům dráhy získaných v předchozím bloku vypočetního řetězce.

2.5.5 Plánování trajektorií

Pro stanovenou geometrii dráhy se vypočítá maximální rychlostní profil. Zároveň je vypočítána brzdná trajektorie pro případy nenadálých událostí, kdy nemůže být trajektorie dokončena jako například požadavek na náhlé zastavení, chyba programu, příliš zatížený procesor nebo chybějící Motion Packets. Pro tuto situaci jsou do celého průběhu trasy dopočítány brzdné trajektorie, které zastaví pohyb robotu.

2.5.6 Vzorkování trasy

Tento konečný blok rozdělí vypočtenou trasu na body, které se postupně budou předávat jednotlivým osám systému. Body jsou poté posílány cyklicky a mohou být taktéž zobrazovány na operátorském panelu. Graf je znázorněn na obrázku č.7.



Obrázek 7: Graf navzorkovaných souřadnic os

3 Rozbor a výběr prostředků řízení B&R

Následující kapitola se věnuje procesu rozboru a výběru HW komponent řídicího systému. Komponenty jsou vybírány pro tříosý paletizér, který je sestaven pomocí 3D tisku, jeho návrh je popsán v kapitole č.5. Jedná se o robota se sériovou kinematikou s třemi osami v podobě krokových motorů velikosti NEMA23. Požadavky na řídicí systém jsou zejména na kompaktnost, tudíž co nejmenší rozměry, ale s co možná největším výkonem. Rozsah při výběru komponent výrazně omezuje požadavek na použití SW komponenty mapp Motion, konkrétně s robotickým balíkem mapp Robotics nově podporující krokové motory. Níže je vždy vybrán modul řídicího systému reprezentován několika možnými řešeními. Na konci rešerše každého řešení je řečeno, zdali je použit ve výsledné konfiguraci. Závěrem této kapitoly je vyobrazena finální konfigurace a jsou popsány všechny nezbytné prvky k sestavení a propojení vybraných modulů.

3.1 Procesorový modul

Jelikož je na celý systém kladena určitá náročnost, je potřeba nejprve přistoupit k výběru procesorového modulu, na jehož výkonu bude záviset celý zbytek systému. Základním požadavkem, který musí být splněn, je podpora funkcionality mapp Motion, které je využito v této práci a zároveň je nejnáročnější SW komponentou, kterou bude procesor obsluhovat.

Výběr probíhal ze tří řad produktů od nejvýkonnějšího Automation PC 910, přes X20 CPU až po tu nejkompaktnější X20 Compact-S CPU.

3.1.1 Automation PC910

Tato řada produktů je stavěna pro ty nejnáročnější podmínky a ty nejvýkonnější operace včetně systémů vyžadujících zpracování obrazu. Průmyslový počítač APC910 je navržen pro různé podmínky, uživatel si tedy může zvolit moduly, kterými chce kovové šasi vyplnit. Tato řada průmyslových počítačů navazuje na předchozí APC810 a zachovává si její nejdůležitější parametry, jako jsou základní komunikační porty a jejich umístění, dále jsou zachovány montážní otvory pro snadnou výměnu za starší systém. Vysoká spolehlivost a dlouhá životnost je dosažena z velké části eliminací pohyblivých částí, jako jsou například ventilátory. Chlazení elektroniky je řešeno především pomocí pasivních chladičů, které při správné instalaci umožňují práci v prostředích dosahujících teplot až 55°C v závislosti na vnitřní konfiguraci modulů průmyslového počítače. Pro prostředí s vyššími teplotními podmínkami je možné doplnit šasi o modul s ventilátory, což se může promítnout na nutnosti větší frekvenci údržby.

Automation PC910 není hotový produkt a je jej třeba poskládat z následujících komponent.

- Systémová jednotka - Šasi
- Sběrníkový modul - PCI a PCIe sběrnice
- Základní deska - Slot pro Intel iCore procesor

- Chladič - aktivní nebo pasivní
- Sada ventilátorů - není nutností, závisí na zvoleném chladiči
- RAM paměť - DDR3, DDR4
- Úložiště dat - CFast, HDD, SSD, DVD mechanika
- Operační systém - Windows, Linux, Automation Runtime



Obrázek 8: APC910 šasi[9]

Šasi, vyobrazené na obrázku č.8, je svařeno z robustního materiálu sestaveno a ošetřeno tak, aby chránilo elektroniku uvnitř proti vnějším vlivům po řadu let nepřetržitého provozu. Šasi je možné pořídit se speciálním nátěrem pro použití v podmínkách s agresivním prostředím, které by mohlo obyčejné šasi poškodit.

Sběrníkový modul slouží pro rozšíření jednoho PCIe sběrníkového konektoru, umístěném na základní desce, na více konektorů různých typů. Díky vhodnému modulu je možné připojit karty komunikující pomocí PCI, PCIe x4, PCIe x8.

Hlavní funkcí základní desky je propojovat mezi sebou veškeré moduly k ní připojené, tyto operace obsluhuje procesor, který je na desce osazen. Moduly základní desky se liší podle použitého procesoru vybraného z pěti variant, které jsou popsány v tabulce č.3. Podle výkonu procesoru je možné přizpůsobit náročnost programového vybavení, protože díky použitým procesorům Intel iSeries je možné využít jejich vestavěné grafické karty, kterou může využívat například komponenta mapp View bez jakéhokoli omezení, stejně jako je možné podle náročnosti využívat i Vision komponenty pro zpracování obrazových dat.

Chladiče jsou nezbytnou součástí celého průmyslového počítače, jsou navrženy tak, aby využívaly proud vzduchu, který vzniká tepelnou výměnou mezi chladičem a okolním prostředím, tím se eliminují pohyblivé části v podobě ventilátorů. Pro tepelně náročné podmínky však je zapotřebí zvolit chladiče aktivní, jejichž doplňkem je v ideálním případě ventilátorový modul zvyšující účinnost chlazení.

Tabulka 3: Možné moduly základních desek pro APC910 a jejich procesory

Číslo produktu	Procesor	Počet jader	Frekvence procesoru
5PC900.TS17-00	Intel Core i5 6440EQ	4	2.7GHz
5PC900.TS17-01	Intel core i3 6100E	2	2.7GHz
5PC900.TS17-02	Intel Celeron G3900E	2	2.4GHz
5PC900.TS17-03	Intel Xeon E3-1515MV5	4	2,8Ghz
5PC900.TS17-04	Intel Core i7 6820EQ	4	2,8GHz

Operační paměti RAM se osazují do základní desky a slouží jako volatilní paměť pro mezi-výpočty procesoru. Možné je pořídit paměti od 2GB DDR3 až do 16GB DDR4.

Úložiště dat slouží pro uložení operačního systému a programu, je možné na něj ukládat omezené množství dat nasbírané během procesu. Jedním z modulů může být HDD, který ovšem obsahuje pohyblivé části a je náchylný na otřesy, což může vést k častějším poruchám. K dispozici jsou ovšem spolehlivější CFast karty, které nahradily CompactFlash karty, používané v starších modelech.

Produkt APC910 je velmi výkonný, ale jeho výkon by při řízení tříosého paletizéru nebyl využit a jednalo by se o zbytečné naddimenzování výkonu procesorového modulu. Rozměry šasi a celková váha sestaveného Automation PC jsou v rozporu s požadavkem na co nejvyšší kompaktnost, APC910 proto nebyl vybrán do HW konfigurace diplomové práce. Veškeré informace jsou čerpány z dokumentace[9] k produktu APC910 .

3.1.2 Procesorový modul X20CP1586

Tento procesor je z řady, která cílí na běžné použití průmyslových automatů až po náročné výpočetní aplikace. Použití modulu v X20 systémech je nezbytné pro jejich funkci, jelikož právě tento modul je vybaven svým výpočetním výkonem. Procesor X20CP1586 je oproti APC910 hotový produkt s pevnou konfigurací, nelze jej upravovat, kromě změny paměti pro operační systém a program.



Obrázek 9: Procesorový modul X20CP1586[10]

Modul nesoucí označení X20CP1586, vyobrazený na obrázku č.9, je zasazen v plastovém šasi, které chrání elektroniku proti mechanickému poškození. Chybí zde odolnost proti prachu a vodě, jelikož je viditelné žebrování, které umožňuje odvod tepla zevnitř. Procesor Intel Atom uvnitř šasi s obnovovací frekvencí 1GHz je doplňován pamětmi DDR2 o velikosti 512MB. Operační systém je uložen na výměnném paměťovém médiu zvaném CompactFlash, které může mít velikost od 512MB až po 8GB. Při chodu je generováno teplo, které je odváděno pomocí pasivních chladičů do okolního prostředí. Použití pasivních chladičů snižuje nutnost údržby a poruchovost systému bez pohyblivých částí. Externí zařízení mohou být připojeny pomocí dvou dostupných USB pro Technology Guard dongle, případně pro externí paměťové médium. Komunikační rozhraní POWERLINK a Ethernet je taktéž dostupné z čela modulu a slouží pro komunikaci s dalšími procesními prvky. Nepatrný je kryt pro baterii, která slouží k uchování dat v případě vypnutí, nebo výpadku elektrické energie. Volatilní paměť, která je pod baterií umístěna, slouží k uchování inicializačních dat, případně důležitých hodnot vygenerovaných v průběhu procesu. Nejdůležitější parametry jsou shrnuty v tabulce č.4.

Tabulka 4: Parametry procesoru X20CP1586

Parametr	Popis
Rozhraní	Ethernet, RS232, POWERLINK, X2X Link, USB
Procesor	Intel Atom E680T
Takt procesoru	1,6GHz
RAM	512MB DDR2
Napájení	24V stejnosměrné
Výkon	7W
Chlazení	Pasivní

Signalizační část tvoří série LED, které informují uživatele o aktuálním stavu, ve kterém se procesorový modul může nacházet, což usnadňuje práci v případě poruchy některého z prvků v celém řídicím systému.

Napájení je zajištěno externím zdrojem stejnosměrného napětí 24V pomocí pevné karty, která spolu s napájením umožňuje připojení RS232 sběrnice. Prázdné místo, které procesorový modul má vedle napájecího bloku, slouží pro vsunutí karty s jinými komunikačními rozhraními.

Modul je pro aplikaci řízení tříosého paletizéru naprosto dostačující, bez problému by zvládl SW komponentu mappMotion, taktéž splňuje požadavky na kompaktnost systému. Tento modul je připraven na případné rozšíření o vizualizaci komponentou mappView, kterou lze s jistými omezeními na tomto procesorovém modulu provozovat. Přes veškeré výhody tento modul ve výsledné konfiguraci není, jelikož existuje kompaktnější produkt, který je zmíněn v následujícím textu. Veškeré informace byly čerpány z dokumentace [10] k procesorovému modulu X20CP1586.

3.1.3 Kompaktní procesorový modul X20CP0484

Posledním adeptem na vhodný procesorový modul je X20CP0484, což je nejsilnější procesor z řady Compact-S. Vzhled modulu je na obrázku č.10. Jedná se o rozměrově velmi malý modul, jehož plastové šasi s ventilačními otvory vespod a na vrchní části nemá mnoho viditelných periférií. Dostupné jsou dva USB konektory pro připojení Technology Guard dongle nebo paměťového zařízení. Ethernet a POWERLINK sběrnice jsou u této nejvyšší verze dostupné z čelního panelu, stejně jako signalizační LED. Šasi chrání elektroniku před vnějšími vlivy, konkrétně se uvnitř nachází ARM procesor CORTEX A9-677 s taktovací frekvencí 677MHz, výpočetní paměť o velikosti 256MB DDR3 a vestavěná fixní paměť pro operační systém o velikosti 1GB. Rozšířit procesorovou jednotku o vstupně výstupní moduly je možné pomocí X2X Link sběrnice. Celé provedení je opět bez jakýchkoli pohyblivých částí, odvod tepla je tedy řešen pomocí pasivního chlazení. Oproti X20CP1586 nemá možnost paměti pod baterií pro inicializační a procesní data, což z tohoto modulu dělá prakticky absolutně bezúdržbový modul.



Obrázek 10: Kompaktní procesorový modul X20CP0484[11]

Výkonově nejsilnější modul z řady Compact-S s ARM procesorem, dostačuje pro řízení aplikací vyžadujících komponentu mappMotion, taktéž rozměry odpovídají požadavkům na vysokou kompaktnost celého systému. Tento procesorový modul je použit pro řízení aplikace tříosého paletizéru, jelikož splnil oba klíčové požadavky. Veškeré informace byly čerpány z dokumentace[11] k procesorovému modulu X20CP0484.

3.2 Moduly řízení motorů

Následující kapitola se zabývá řešením možných modulů pro řízení motorů. Jelikož procesorová jednotka nezvládá komunikovat s motory v patřičné rychlosti, je zde mezistupeň, který obstarává motor a předává data o něm zpět řídicí jednotce. Z produktů firmy B&R je pro aplikaci řízení tříosého paletizéru možné zvolit řešení z řady ACOPOSmicro, což je robustní řešení pro náročné aplikace, a nebo využít X20 modulu pro řízení krokových motorů. Následuje podrobný popis obou možností, jejich výhod a nevýhod.

3.2.1 ACOPOSmicro

Modul ACOPOSmicro se používá pro řízení krokových nebo servo motorů a to až ve dvou osách s jedním modulem. Klíčovou vlastností je univerzálnost, která je znát při programování jednotlivých os. Automation Studio totiž používá stejné funkce a principy řízení pro veškeré řídicí jednotky motorů, tím je docíleno možnosti snadné výměny řízení a motoru samotného. Takto je možné snadno měnit konfigurace pro různé stroje a zařízení. Vzhled jednotky je na obrázku č.11.



Obrázek 11: ACOPOSmicro pro řízení krokových motorů s enkodéry[12]

ACOPOSmicro má integrovaný 24V stejnosměrný výstup, který může být použit například pro přídavné brzdění motoru. Bezpečnost funkce při řízení motorů je poměrně důležité téma, proto je do tohoto modulu implementována funkce STO, která zabezpečuje motor, pokud je v klidovém stavu, proti samovolnému spuštění. Klidový proud motorem může být nastaven podle momentu, který motor potřebuje pro udržení určité váhy, pokud však dojde ke spuštění motoru, proud mnohonásobně vzroste, což má za následek vznik velkého množství tepla, které musí být odvedeno. Tepelná výměna je zajištěna do okolního prostředí běžnými chladiči používající vzduch jako chladicí médium. Pokud je však potřeba chladit velmi intenzivně, je možné jako médium použít vodu nebo olej. Parametry modulu jsou uvedeny v tabulce č.5.

Tabulka 5: Základní parametry ACOPOSmicro 80SD100XS.C04X-01

Parametr	Popis
Napětí	24V až 64V
Nominální proud	10A
Maximální proud	15A (2s)
Rozlišení kroku	256 mikroků na krok
Typ enkodéru	Inkrementální

Řízení krokových motorů pomocí ACOPOSmicro je možné bez použití externích spínačů, protože veškeré meze jsou řešeny na SW úrovni a to včetně proudů. Nabízí se možnost nastavit různé limity pro proud motorem při klidovém stavu, dále pak nominální proud, který je používán při pohybu s konstantní rychlostí a poslední je maximální proud motorem používán při akceleraci. Při pohybu je možné využívat velmi přesného krokování, pokud je využito režimu mikro krokování. V závislosti na motoru je možné rozdělit jednotlivý krok na 256 mikro kroků. Úhel mezi kroky si je ACOPOSmicro schopen korigovat sám v závislosti na rychlosti otáčení hřídele. Pro přesnější dosažení pozice je doporučeno využít motorů s enkodérem, čemuž musí být přizpůsoben i modul řízení.

Pro aplikaci diplomové práce byl uvažován ACOPOSmicro s jedním kanálem pro krokový motor s inkrementálním enkodérem. Tento modul je naprosto dostačující, jelikož plánované B&R motory odebírají maximální proud 6A, kdežto ACOPOSmicro může být zatížen až na nominální proud 10A. Nevýhoda této celé produktové řady je jeho velikost, jelikož je snaha o co nejkompaktnější řešení. Použití tohoto modulu by také bylo zbytečným naddimenzováním celého systému, jelikož existuje přijatelnější a kompaktnější řešení. Veškeré informace byly čerpány z uživatelského manuálu[12] k ACOPOSmicro.

3.2.2 X20SM1446-1

Karta X20SM1446-1 patří do řady X20 pro řízení motorů. Jedná se o velmi kompaktní řešení, svou velikostí totiž karta zabírá dvě pozice na montážní liště a není o nic větší než běžné karty vstupů a výstupu X20 systému. Připojit na ni je možno vždy jeden motor, což znamená řízení pro jednu osu. Plastové šasi na sobě krom konektorů pro motor obsahuje také čtyři digitální vstupy, použitelné pro připojení zpětné vazby z motoru pomocí enkodéru, nebo pro koncové spínače. Pomocí spínačů lze také kontrolovat směr otáčení rotoru. Chování digitálních vstupů je možné konfigurovat v prostředí Automation Studio. Karta má konfigurovatelné limity proudu pro akceleraci, klidový režim a pro pohyb při konstantní rychlosti motoru. Vzhled modulu je na obrázku č.12.



Obrázek 12: X20SM1446-1 karta pro řízení krokových motorů[13]

Možnost sledovat moment motoru je vhodné pro získání nulového bodu motoru nebo pro možnost upravovat velikost protékaného proudu vinutím motoru, čímž se výrazně snižuje jeho spotřeba. Pohyb je možné rozdělit v každém kroku na dalších 256 mikro kroků, na které je možné motor pozicovat. Dosažení požadovaného kroku vždy nemusí být naprosto spolehlivé, různými vlivy může modul ztratit přehled o přesném počtu kroků, z tohoto důvodu zde existuje detekce, která o ztrátě kroku informuje a je možné na tento stav reagovat například navedením motoru do domovské pozice. Pomocí cívek motoru je karta schopna detekovat poškozený motor, případně ze získané charakteristiky identifikovat zapojení nesprávného typu motoru. Základní parametry modulu jsou v tabulce č.6.

Tabulka 6: Základní parametry karty X20SM1446-1

Parametr	Popis
Napětí	24V až 48V
Nominální proud	5A
Maximální proud	10A (1s)
Rozlišení kroku	256 mikroků na krok
Typ enkodéru	Inkrementální

Pro aplikaci této diplomové práce je tento modul použit pro každou z os. Jedná se o kompaktní řešení zapadajícího do stejné řady jako zvolený procesor X20CP0484. Karta má veškeré vlastnosti, které jsou od ní požadovány včetně nominálního proudu motorem, který může dosahovat 5A. Uvažované motory sice dosahují proudu 6A, ale pouze při plné zátěži, které v aplikaci použito nebude. Veškeré informace byly čerpány z dokumentace[13] ke kartě X20SM1446-1.

3.3 Krokové motory

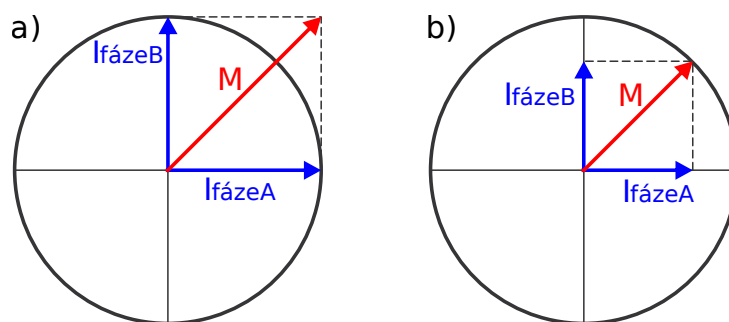
Celý řídicí systém je navrhován pomocí komponent firmy B&R, stejně jako krokové motory, které pohání každou ze tří os paletizéru. Tento typ motoru je široce používán ve všech možných aplikacích a postupně nahrazují stejnosměrné a bezkartáčové stejnosměrné motory. Jejich výhodou je jejich cenová dostupnost, univerzálnost a jednoduchost použití. Schopnost přesného pozicování motorů je možné dosáhnout i bez převodového systému, díky vysokému momentu, kterého je motor schopen dosáhnout v nízkých nebo středních otáčkách. Využití krokových motorů má také svoje limity, které se vyskytují hlavně tam, kde je potřeba, aby motor byl nepřetržitě v provozu, což může vést k velkému oteplení vinutí motoru a jeho zničení. Hlídání teploty u krokových motorů je proto vždy na místě a je třeba na vysokou teplotu reagovat. Obecným problémem všech krokových motorů nastává při vysokých otáčkách, ve kterých ztrácí svůj moment. Vzhled motoru je na obrázku č.13.

Krokování po celých krocích je jedním ze tří režimů řízení. Celé kroky umožňují pohyb o $1,8^\circ$. Výhodou je dosažení maximálního momentu, jelikož může být použit maximální proud motorem. Nevýhodou je, že plný krok nikdy nemůže být dosažen přesně ihned díky oscilačnímu efektu. S každým plným krokem taktéž slábne velikost momentu, což může vést k zastavení



Obrázek 13: Krokový motor 80MPD5.300S000-01[14]

motoru. Hlasitý zvukový projev motoru je taktéž důsledkem použití krokování po celých krocích. Maximální proud však s sebou nese zvýšení ztrát přibližně o 50%, což vede k výraznému zvýšení teploty motoru s důsledkem nižší životnosti motoru. Maximální proud lze snížit o polovinu, čímž se oslabí i velikost momentu a redukuje oteplení motoru. Fázorové diagramy zobrazující proudy a moment jsou na obrázku č.14.

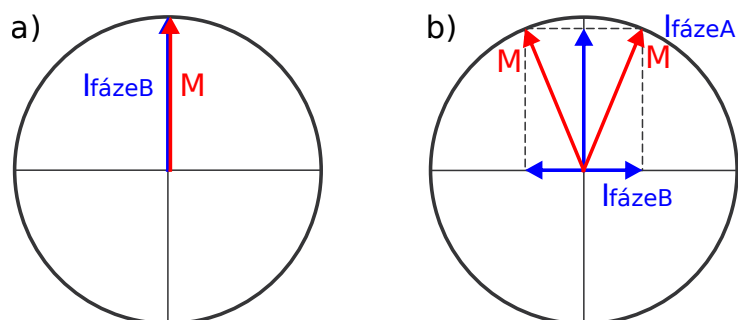


Obrázek 14: Fázorový diagram režimu celých kroků, a) bez redukce proudu b) s redukcí proudu [14]

Krokování po polovičních krocích dosahuje úhlu $0,9^\circ$ mezi jednotlivými kroky. Napájení cívek statoru je možné dvěma způsoby.

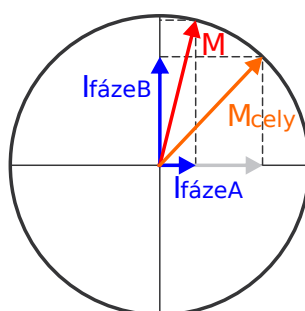
1. Řízení střídá mezi jednou a dvěma cívkami, kterými protéká proud. Důležité je redukovat proud při dosažení plného kroku kvůli správnému vyvážení momentové charakteristiky. Fázorový diagram je na obrázku č.15a
2. Napájeny jsou obě vinutí proudem tak, že vektor točivého momentu je posunut o $22,5^\circ$. Tato metoda je znatelně lepší, jelikož potlačuje kmitání točivého momentu. Fázorový diagram je na obrázku č.15b

Mikro krokování je třetím režimem řízení krokových motorů. K tomuto režimu je potřeba řídicí systém, který jej podporuje. Řízením po tak malých skocích dokáže úhel pohybu zmenšit až na $0,007^\circ$, pokud je dostupných 256 mikro kroků mezi kroky celými. Tímto režimem je



Obrázek 15: Fázorový diagram režimů půl krokování, a) způsob 1 b) způsob 2 [14]

možné dosáhnout konsistentní momentové charakteristiky, vysoké přesnosti a tichého provozu krokového motoru. Fázorový diagram je na obrázku č.16.



Obrázek 16: Fázorový diagram režimu mikro krokování [14]

Zpětná vazba motoru v podobě enkodéru zvyšuje přesnost opakovatelnosti pohybu až pod $0,1^\circ$. Motory využívají magnetický ABR inkrementální enkodér s rozlišením 10 bitů, SSI enkodér s rozlišením 12 bitů a Hiperface enkodér s rozlišením 16 bitů.

Sortiment firmy B&R nabízí tři velikosti motorů, které se liší velikostí momentů a stupněm krytí proti vnějším vlivům. Varianty jsou porovnány v tabulce č.7. Speciální požadavky umožňují rozšíření stupně krytí až na úroveň IP65, zároveň lze také použít možnost brzdy motoru, která zastává bezpečnostní funkci v případě, kdy selže napájecí zdroj. Brzda motoru zajišťuje rotor motoru proti pohybu pomocí permanentního magnetu v případě odpojení napájení. Uvolnění brzdy je možné po připojení stejnosměrného napětí 24V.

Tabulka 7: Velikosti krokových motorů firmy B&R[14]

Parametr	80MPD	80MPF	80MPH
Velikost přírubby	56.4mm (NEMA 23)	60mm	87,1mm (NEMA 34)
Držící moment	1,1 až 3Nm	1,15 až 3,5Nm	4 až 13,6Nm
Moment stání	0,8 až 2,2Nm	0,81 až 2,5Nm	2,9 až 9,3Nm
Krytí	IP30	IP30	IP40

Pro aplikace řízení paletizéru jsou potřeba tři motory pro pohyb ve třech osách, jejich parametry jsou uvedeny v tabulce č.8. Motory jsou se zpětnou vazbou zajištěnou inkrementálními

ABR enkodéry. Vybrány byly dva nejsilnější motory 80MPD5.600S014-01 pro pohyb s rameny bez použití převodovky. Motor hýbající podstavou 80MPD3.600S014-01 je kratší verze se slabším momentem. Všechny tři motory využívají paralelního zapojení vinutí, což dovoluje proud až 6A a zmírňuje pokles momentu při vyšších otáčkách. Veškeré informace byly čerpány z dokumentace[14] ke krokovým motorům firmy B&R.

Tabulka 8: Parametry vybraných motorů

Typ motoru	80MPD5.600S014-01	80MPD3.600S014-01
Velikost	NEMA23	
Délka těla motoru	80,5mm	57,5mm
Váha	1400g	880g
Vinutí	Paralelní	
Proud	6A	
Moment stání	2,2Nm	1,25Nm
Držící moment	3Nm	1,8Nm
Úhel kroku	1,8°	

3.4 Napájecí zdroj

Celý systém řízení musí být napájen stejnosměrným napětím o velikosti 24V, proto je potřeba použít průmyslový zdroj napětí, který transformuje síťové střídavé napětí 230V do požadované úrovně. Vyjímkou jsou motory, které mohou být napájeny až 80V, řídicí karty X20SM1446-1 však limitují napětí na maximálních 48V. Zdroj musí svým výkonem převyšovat součet výkonů všech komponent k němu připojených. Zdroj by neměl být na hranici se součtem výkonů všech komponent kvůli výkonnostní rezervě pro pokrytí špiček, zejména u induktivní zátěže jakou jsou například motory. Součet výkonů všech komponent je v tabulce č.9, která zobrazuje hodnoty při stejnosměrném napětí 24V pro výkonovou i řídicí část.

Tabulka 9: Výkon jednotlivých komponent systému při 24V

Komponenta	Označení	Počet	Výkon
Procesor	X20CP0484	1	2,95W
Řídicí karta motorů	X20SM1446-1	3	7,2W
Motor	80MPD5.600S014-01	2	288W
Motor	80MPD3.600S014-01	1	144W
Celkový výkon			442,15W

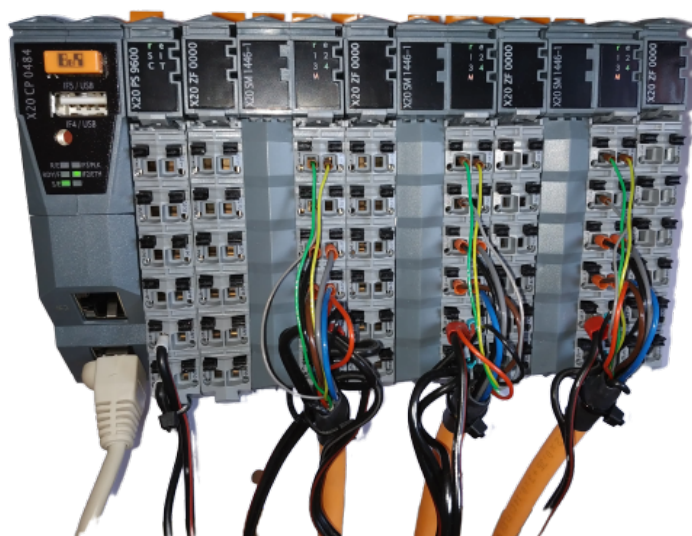
Zvolený zdroj 0PS1200.1 dokáže napájet stejnosměrným napětím 24V zařízení s proudovým odběrem až 20A, což je výkon 480W. Tento průmyslový zdroj, jehož výrobcem je firma B&R, je v kovovém šasi bez aktivního chlazení s možností montáže na DIN lištu. Svorky pro připojení vstupního střídavého napětí v rozsahu 110V až 240V jsou šroubovací a zapuštěné v čelním panelu spolu se vstupními svorkami, které mají regulovatelnou hodnotu stejnosměrného napětí

od 22,5V až po 29,5V pomocí potenciometru. Kladné svorky napětí jsou dvě pro jednoduchost připojení více napěťových větví. Počet záporných svorek je o jednu vyšší z důvodu usnadnění zemnění systému. Zdroj poskytuje ochranu proti zkratu, možnost zapojení dvou zdrojů paralelně pro výkonové posílení, nebo zajištění redundantního napájení v případě selhání zdroje. Veškeré informace byly čerpány z dokumentace[15] k průmyslovému zdroji.

3.5 Finální konfigurace systému řízení tříosého paletizéru

Kompletní HW konfiguraci netvoří pouze zdroj, procesorový modul, řízení motorů a motory samotné, ale je potřeba brát v potaz povinné příslušenství. Tyto komponenty jsou důležité pro umístění modulů na DIN lištu, taktéž se jedná o svorkovnice, bez kterých by nebylo možné ke kartám fyzicky připojit externí zařízení. Reálná konfigurace je zobrazena na obrázku č.17 s logickým schématem na obrázku č.18. Výpis všech komponent finální konfigurace je v tabulce č.10.

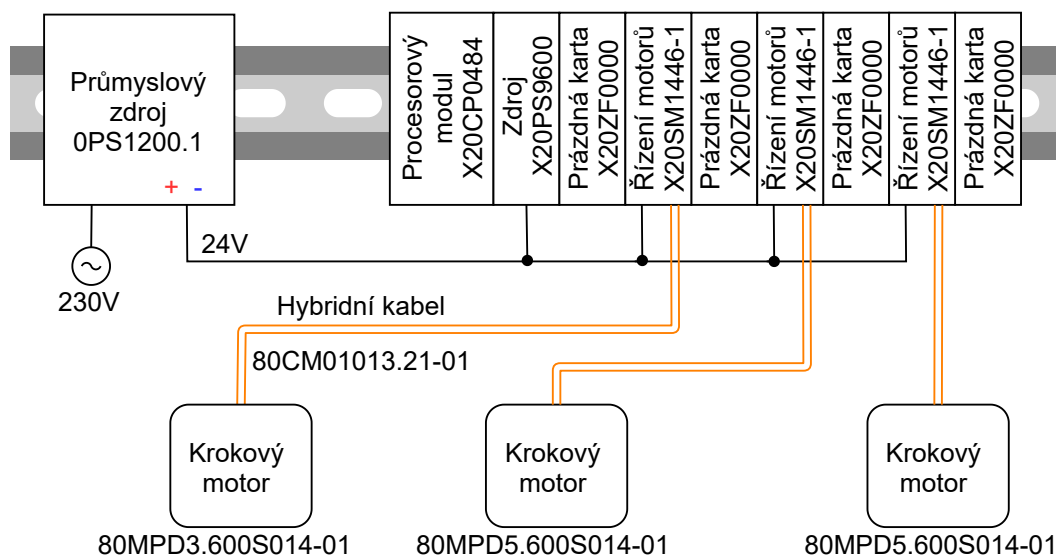
Napěťový zdroj je jako samostatná jednotka, která nepotřebuje žádné speciální příslušenství. K jeho funkci je jen potřeba třížilový kabel pro připojení do sítě a dodatečná kabeláž pro připojení zařízení k sekundární straně.



Obrázek 17: HW konfigurace finální reálné konfigurace systému

Procesorový modul X20CP0484 potřebuje k upevnění na DIN lištu takzvané záda, kterými je taktéž vedena sběrnice X2X. Napájecí zdroj X20PS9600 je umístěn v zádech procesorového modulu a slouží k připojení stejnosměrného napětí 24V, taktéž jsou na něm konektory pro CAN a RS232 sběrnici. K fyzickému připojení kabeláže je potřeba terminál X20TB12.

Karty X20SM1446-1 pro řízení krokových motorů potřebují taktéž pro montáž na DIN lištu záda X20BM31 a terminál X20TB12. Tento set je potřeba pro každý motor, tudíž je v konfiguraci umístěn třikrát. Problém karet řízení je jejich oteplení. Doporučení v dokumentaci[13] pro



Obrázek 18: Logické schéma finální HW konfigurace

zvýšení odvodu tepla do okolí se zmiňuje o přidání prázdných karet X20ZF0000, které nevykonávají žádnou funkci, jen vyplňují místo mezi kartami pro odvod tepla. Prázdné karty taktéž potřebují záda X20BM11 a terminál X20TB12.

Motory jsou kompletní a není potřeba dalších komponent pro jejich funkci. Kabeláž k těmto motorům je možné provést jakýmkoli způsobem, avšak pro vzhled a lepší manipulaci byly pořízeny hybridní kabely 80CM01013.21-01 o délce jednoho metru. Kabel v sobě obsahuje vodiče pro silové napájení cívek motoru, vodiče nesoucí informace z ABR inkrementálního enkodéru a vodič pro propojení země.

Technology Guard je zařízení, na kterém jsou uloženy veškeré potřebné licence pro správný a spolehlivý chod programu. Toto zařízení je USB dongle a zasouvá se do jednoho z dostupných konektorů na procesorovém modulu.

Tabulka 10: Shrnutí konfigurace systému řízení tříosého paletizéru.

Komponenta	Označení	Počet
Průmyslový zdroj	0PS1200.1	1
Procesor	X20CP0484	1
Napájecí zdroj	X20PS9600	1
Záda procesoru a zdroje	X20BB52	1
Prázdná karta	X20ZF0000	4
Záda prázdné karty	X20BM11	4
Řídící karta motorů	X20SM1446-1	3
Záda řídící karty motorů	X20BM31	3
Terminály	X20TB12	8
Motor	80MPD5.600S014-01	2
Motor	80MPD3.600S014-01	1
Hybridní kabel	80CM01013.21-01	3
Technology Guard	0TG1000.02	1

4 Rozbor možností posuzování jakosti řízení u robotického systému

Následující kapitola se zabývá metodami a principy měření kvality robotického systému. Parametry, podle kterých se roboty srovnávají a charakterizují, jsou nejčastěji spjaty s přesností dosažitelnosti polohy, rychlostí s jakou dokáže úlohu vykonat a hlavně opakovatelnost pohybu. Měření parametrů probíhá ve specializovaných laboratořích pro analýzu a identifikování robotických systémů, nejčastěji s výpomocí velmi přesných zařízení pro měření potřebných veličin. Používány jsou mikrometry, magnetické, laserové nebo kamerové systémy se zpracováním obrazu. Pro sjednocení parametrů mezi výrobci byla tato měření normalizována mezinárodní organizací pro tvorbu norem v roce 1998. Dokument s označením ISO9283:1998 je stále platný a byl v roce 1999 převzat českým normalizačním institutem, který zpracoval českou verzi dokumentu[16]. Česká norma byla v roce 2014 zneplatněna. Mezinárodní norma by podle dostupných informací měla být revidována v intervalu pěti let, přičemž poslední revize proběhla v roce 2014, nepředpokládá se tedy přílišná odlišnost od české verze normy.

Dle normy je na jejím uživateli, aby si zvolil metody vhodné pro jeho aplikaci a měřil tak parametry hodící se pro specifický systém. Testovací postupy, které jsou v ní zmíněny, je možné použít jako celek, a nebo využít pouze její části. Zároveň norma nevyjadřuje jakými prostředky má měření probíhat, je tedy zcela na uživateli jaký prostředek pro změření veličin použije. Uvedeny jsou pak výpočty, díky kterým lze z naměřených hodnot vyčíslit zvolený parametr.

Následující kapitoly postupně rozebírají postup měření jednotlivých parametrů robotického systému od přípravy podmínek měření až po samotné principy a postupy při testování. Kapitola se věnuje zejména testování jakosti parametrů polohy. Vysvětlení měření parametrů dráhy není detailní, jelikož tyto parametry nejsou diplomovou prací zohledněny.

4.1 Zkušební podmínky

Před samotným měřením vybraných parametrů je vhodné dodržet doporučené podmínky pro testování, které se týkají okolních teplot, zahřívacích procesů a podobně.

4.1.1 Podmínky robotu

Robot by měl být před spuštěním testu upevněn dle specifikace požadované aplikace a neměl by být v rozporu s doporučeními výrobce. Samozřejmostí je požadavek na kompletnost robotu a jeho mechanických součástí a musí být schopen vykázat plnou funkčnost. Doporučeno je systém před provedením testů provést zahřívacím procesem s výjimkou zkoušek driftu, které se provádí i v chladném stavu.

4.1.2 Podmínky okolního prostředí

Veškeré testy, popsány normou ČSN EN ISO 9283, jsou platné pouze za předpokladu splnění nastavení podmínek okolního prostředí. Dodržením je zajištěna opakovatelnost měření a možnost srovnání výsledků testů naměřených při stejných podmínkách. Prostředí je třeba přizpůsobit tak, aby nebylo v rozporu s požadovanou úrovní teploty, relativní vlhkosti, elektromagnetického a elektrostatického pole, rušení rádiovými frekvencemi, nečistotami ovzduší a nadmořskou výškou[16].

Zkušební prostor okolo robotu by měl mít ideálně teplotu ovzduší 20°C, což může být v některých podmínkách obtížné dodržet, proto může nabývat i jiných hodnot a musí být zaznamenána v protokolu o zkoušce. Během průběhu testu by se teplota neměla změnit o více než 2°C. Tepelná výměna mezi prostředím, měřicími prvky a robotem probíhá dlouhou dobu, proto je doporučeno veškeré potřebné zařízení pro měření nechat ustálit minimálně osm hodin při stabilních podmínkách okolního prostředí.

4.1.3 Přizpůsobení měřicích přístrojů

Při volbě měřicího přístroje je potřeba dbát na jeho dynamické charakteristiky a volit přístroj tak, aby výsledky měření nebyly zbytečně zkreslené. Vzorkovací frekvence měření musí být vhodně zvolena podle vzorkovacího teorému, tudíž by měla být minimálně dvojnásobkem nejvyšší harmonické frekvence měřené veličiny, ideálně však je pracovat alespoň s desetinásobkem. Výhodou je značné ulehčení analýzy dat, eliminace hrubých chyb a přesnější průběh hodnot celého měření. Měřicí přístroj musí být kalibrován a musí být známa přesnost přístroje pro výpočet nejistot měření. Při měření je potřeba uvažovat[16]:

- Chyby přístrojového vybavení
- Systematické chyby spojené s použitou metodou
- Chyby výpočtu

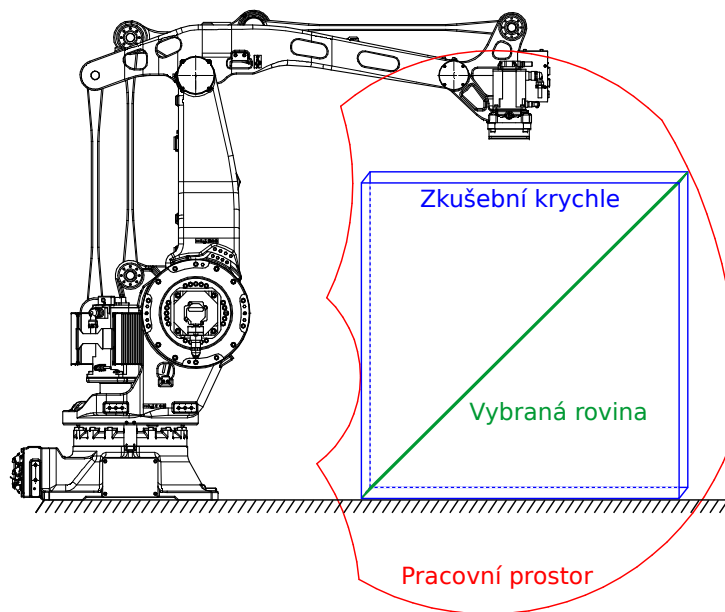
4.1.4 Zkušební rychlosti

Robotický systém může vyhovovat požadavkům pro zvolenou aplikaci při určité rychlosti, proto je potřeba testování provádět nejen při jmenovité rychlosti, což je rychlost při maximálním dovoleném výkonu motorů. Parametry polohy a dráhy se testují ve třech možných úrovních.

- Při testování parametrů polohy je možné použít pouze maximální hodnotu jmenovité rychlosti, polovina a desetina jmenovité rychlosti je pro tento typ zkoušky nepovinná
- Při testování parametrů dráhy je povinné každý test provést při maximální, poloviční a desetině jmenovité rychlosti bez výjimky

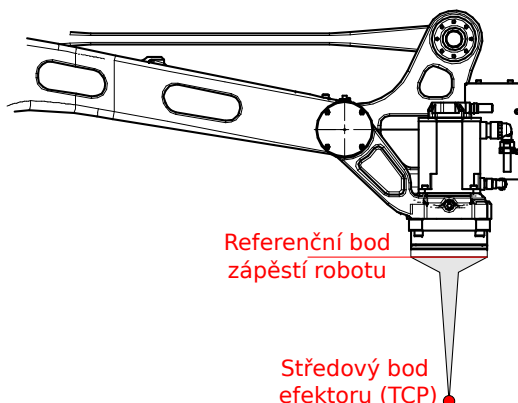
4.1.5 Volba zkušebních poloh a drah

V pracovním prostoru robotu se před měřicím procesem definuje krychle o co největších rozměrech tak, aby každý její bod byl robotem dosažitelný a zároveň její umístění odpovídalo nejfrekventovanější pracovní oblasti robotu. Ve vnitřním prostoru krychle je definovaná rovina, která musí být umístěna napříč krychlí. Příklad umístění krychle s vhodnou vybranou rovinou u paletizačního robotu Fanuc M-411iC/110[17] je na obrázku č.19.



Obrázek 19: Pracovní prostor roboru Fanuc M-410iC/110 s vyznačenou zkušební krychlí[17]

Na ploše uvnitř krychle je zvoleno pět bodů na úhlopříčkách a označují referenční body umístění zápěstí robotu. Měřicí rovina je pak posunuta na středový bod efektoru a je k zvolené rovině rovnoběžná. Kde se na robotu nachází zápěstí robotu a středový od efektoru znázorňuje obrázek č.20.



Obrázek 20: Umístění zápěstí a středového bodu efektoru robotu

Zkoušené polohy musí být určeny souřadnicemi základny robotu, nebo uvedeny v souřadnicích kloubu. Požadované pohyby mezi jednotlivými body na rovině musí probíhat tak, aby byly v činnosti všechny klouby, zároveň by střed mechanického propojení zápěstí robotu měl směřovat stále stejným směrem a měl by být ve stálem kontaktu s rovinou. Průchody zvolenými drahami se opakují několikrát, doporučené počty jsou stanoveny normou.

Kroky měření nemají nařízený postup, je však doporučeno provést zkoušku stabilizace před zkouškou opakovatelnosti polohy. Současně pak mohou být provedeny zkoušky překmitu, jednosměrné přesnosti a opakovatelnosti polohy. Drift parametrů robotu musí být měřen samostatně po dobu osmi hodin. Doporučeno je taktéž zkoušky rychlosti provádět před zkouškou měření přesnosti dráhy[16].

4.2 Parametry polohy

V této kapitole jsou vyjádřeny parametry polohy měřené dle ČSN EN ISO 9283. Parametry polohy jsou měřeny v předem zvolené rychli pomocí pozicování robotu v pořadí mezi pěti zvolenými body. Normou jsou odlišované dvě polohy podle způsobu jakým je dosaženo cílové pozice[16]:

- Zadaná poloha je určena operátorem nebo programátorem pomocí učení externím ovladačem, přímého zadání pozice nebo programování off-line
- Dosažená poloha je dosažená poloha pomocí automatického režimu robotického systému jako odezva na zadanou polohu

Mezi zadanou a dosaženou polohou vznikají rozdíly, zejména u měření přesnosti a opakovatelnosti pohybu, tyto rozdíly mohou být způsobeny nedokonalostmi mechanické konstrukce, chybami při výpočtu transformace souřadnic, teplotou a dalšími okolními vlivy.

4.2.1 Jednosměrná přesnost a opakovatelnost polohy

Jednosměrná přesnost polohy určuje schopnost robota v automatickém režimu dosáhnout pozice co nejbližší zadané polohy, vždy ze stejného směru. Toto měření je doporučeno opakovat v třiceti cyklech, přičemž jeden cyklus znamená vystřídaní všech pěti bodů na zvolené rovině rychle, vždy musí probíhat ve stejném pořadí, aby byla splněna dosažitelnost vždy ze stejného směru. Výslednou číselnou hodnotou je rozdíl mezi jedinou zadanou hodnotou a těžištěm vypočítaného z dosažených bodů robotu. Výpočet číselné hodnoty pak probíhá pro každou z pěti pozic zvlášť.

Existuje také parametr vícesměrná přesnost polohy, která se od jednosměrné liší pouze podobou cyklu a směry, ze kterých se robot přibližuje k zadané poloze. Postupně se testuje každý bod zvlášť pro přiblížení ze tří směrů souřadnicového systému opět s opakováním třiceti cyklů.

Jednosměrná opakovatelnost polohy určuje s jakou přesností se shodují jednotlivé dosažené body při pokusu o najetí do polohy zadané. Data mohou být sbírána v průběhu testu jednosměrné přesnosti polohy.

4.2.2 Přesnost a opakovatelnost vzdálenosti

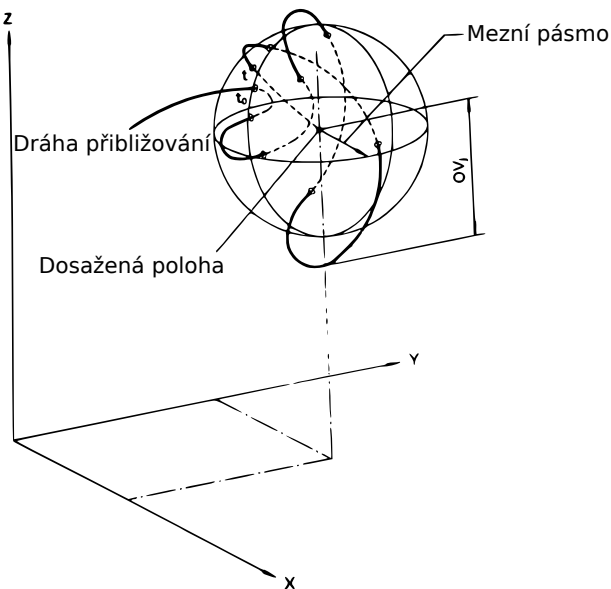
Vzdáleností jsou myšleny parametry mezi dvěma body na zvolené rovině. Mezi těmito dvěma body se robot pohybuje v třiceti cyklech v automatickém módu se záměrem dosáhnout zadané polohy každého z bodů.

Přesnost vzdálenosti pracuje s dvěma body, mezi kterými je zadaná vzdálenost. Robot se pohybuje mezi těmito body a vzniknou dva středy z dosažených bodů. Výsledkem je odchylka od zadané vzdálenosti.

Opakovatelnost vzdálenosti určuje s jakou přesností byly dosaženy polohy při opakovaném měření.

4.2.3 Doba stabilizace polohy

Testování probíhá v posloupnosti všech pěti bodů na zvolené rovině. Střed mechanického propojení robotu je v každém z bodů tak dlouho, dokud nedojde k jeho ustálení v dosažené pozici. Kolem dosažené pozice je vytvořeno kruhové mezní pásmo, ve kterém je pohyb považován za ustálený. Doba stabilizace polohy je čas od prvního vstupu do mezního pásma až po čas kdy jej středový bod mechanického propojení neopustí. Cyklus je opakován třikrát a je vypočtena střední hodnota pro každou z poloh. Tento parametr souvisí s překmitem robotu. Měření stabilizace polohy je znázorněno na obrázku č.21.



Obrázek 21: Znázornění stabilizace polohy s mezním pásmem[16]

Překmit polohy je měřen jako maximum vzdálenosti od dosažené polohy po přechodu do mezního pásma a kdy tlumený pohyb robotu mezní pásmo opět opustí[16].

4.2.4 Drift parametrů polohy

Samotný drift se měří od prvotního spuštění robota a může být součástí zahřívacího cyklu. Sleduje se vliv teploty součástí na jednosměrnou přesnost a opakovatelnost polohy. Měření by mělo probíhat po dobu osmi hodin s výjimkou, kdy rozsah změn driftu klesne pod deset procent největšího rozsahu v průběhu první hodiny testu. Měření má specifický průběh, kdy nejprve probíhá měřicí cyklus, který spočívá v pohybování robotu mezi dvěma body a při zpětném pohybu je potřeba hýbat všemi klouby robotu. Pokud teplota nedosáhla ustáleného stavu a drift není menší než deset procent, probíhá před další měřicím cyklem zahřívací proces, který trvá deset minut a během něj je pohybováno mezi stejnými dvěma body při plné jmenovité rychlosti s pohybem kloubů alespoň o sedmdesát procent jejich plného rozsahu.

4.3 Parametry dráhy

Parametry dráhy jsou velmi podobné parametrům polohy i zde se používá pojem zadaná dráha pro naprogramovanou linii, které robot s nějakou odchylkou dosahuje. Změna dráhy by neměla způsobit značnou změnu výsledných parametrů.

4.3.1 Přesnost a opakovatelnost dráhy

Robot pohybuje svým středem mechanického propojení po zadané dráze tak, aby byly v pohybu všechny jeho klouby. Při získávání dat o přesnosti pohybu je desetkrát opakovaná zadaná dráha, tu robot podle očekávání dosáhne vždy s odchylkou. Soubor dosažených drah vytvoří jednu těžištní čáru po celé trase, ta je výsledkem měření.

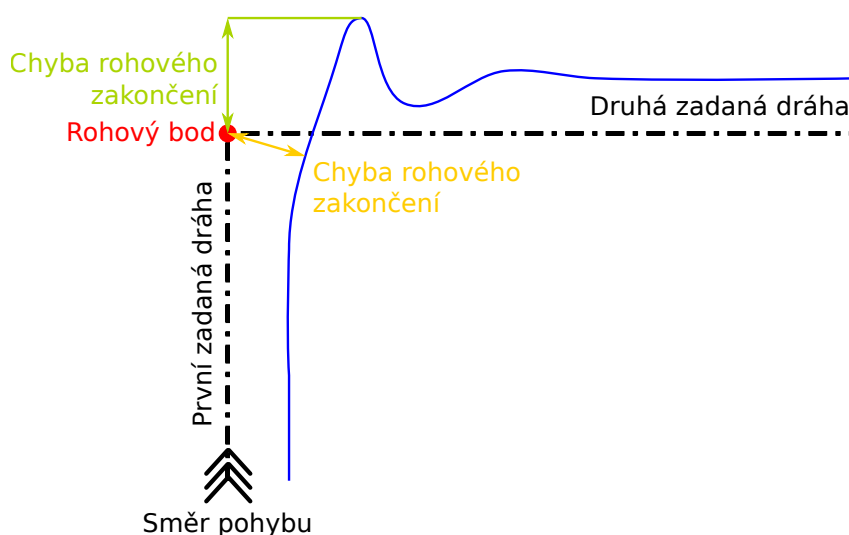
Výsledkem opakovatelnosti dráhy jsou kružnice, které mají střed na těžištní čáře a jejichž poloměr je roven nejvzdálenější dosažené čáře od těžištní čáry.

4.3.2 Rohové odchylky

Ostrý roh je definován jako bod, kde pohyb robotu přechází z jedné dráhy do druhé. Dráhy jsou vůči sobě pravoúhlé. Mechanické namáhání robotu a překmit robotu při průchodu ostrým rohem není zanedbatelný, proto jsou používány zaoblené rohy. Obecně může dojít při pohybu až ke stoprocentnímu snížení rychlosti v okolí styku dvou kolmých drah, chování v těchto případech se však liší podle typu použitého řídicího systému. Rohové odchylky jsou měřeny ve třech cyklech, možný průběh je znázorněn na obrázku č.22.

Chyba rohové odchylky je získávána postupně při každém průchodu kolem rohového bodu, hodnotou pak je nejmenší vzdálenost dosažené dráhy od něj. Výsledným vyjádřením je ta nejvzdálenější ze tří hodnot získaných při každém ze tří cyklů.

Rohový překmit je nejvzdálenější hodnotou ze tří průchodů po tom, co středový bod mechanického propojení protne druhou zadanou dráhu rohu.



Obrázek 22: Znázornění rohových odchylek

4.3.3 Dráhová rychlost

Dráhová rychlost se v průběhu testovací trasy může měnit, a tak testování musí probíhat na úseku dráhy, kde je použita stabilní rychlost a kde proběhla zkouška přesnosti dráhy. Testování probíhá při plném a polovičním jmenovitém zatížení robotu v plné, poloviční a desetinné jmenovité rychlosti. Cyklus měření se opakuje desetkrát.

Přesnost dráhové rychlosti, je chyba mezi zadanou a dosaženou střední hodnotou dráhové rychlosti.

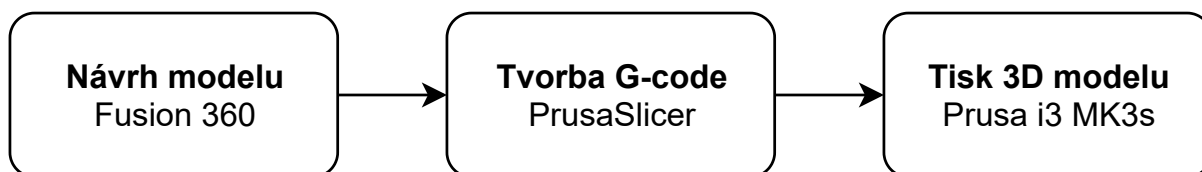
Opakovatelnost dráhové rychlosti je mírou přesnosti shody dosažených rychlostí při stejné zadané rychlosti[16].

5 Návrh a realizace modelu pomocí 3D tisku

Tato kapitola se zabývá návrhem konstrukční části paletizačního robotu, která je zásadní pro realizaci celého modelu. Postupně je zmíněný obecný princip návrhů modelů pro 3D tisk a programy, které jsou využity k vytvoření modelů a tiskových podkladů. Konstrukční část popisuje jednotlivé komponenty, ze kterých se robot skládá, ukazuje jejich výsledný návrh a zmiňuje se o problémech, které nastaly při procesu návrhu nebo tisku. Finální podoba robotu je na obrázku č.44. Při sestavování konstrukce byly brány v potaz požadavky na bezpečnou konstrukci dané normou[18] ČSN EN ISO 10218.

5.1 Prostředky pro návrh a realizaci modelu robotu

Jako první jsou zmíněny prostředky, které byly využity k realizaci čtvrtého bodu zadání diplomové práce. Prostředkem je myšlen SW nástroj pro návrh modelů, vytvoření kódu pro 3D tiskárnu a tiskárna samotná. Celý proces je rozložen do tří kroků vyobrazených na obrázku č.23.



Obrázek 23: Postup pro vytvoření fyzicky hmatatelného modelu pomocí 3D tisku

5.1.1 Fusion 360

Každý díl robotu byl nejprve navrhnout a vytvořen jako prostorový objekt pomocí SW nástroje Fusion 360 z produktové řady Autodesk. Princip tvorby objektu je v tomto nástroji jednoduchý a intuitivní. Nejprve je vytvořena skica ve vybrané rovině souřadnicového systému, do které je zakreslen objekt pomocí dostupných tvarů, kterým jsou dány rozměry. Dokončené skice je následně pomocí nástrojů přidán třetí rozměr, což vytvoří objekt, který může být dále upravován do výsledného tvaru. Práce v tomto SW je velice příjemná, jelikož má velmi rozšířenou uživatelskou základnu, s čímž se pojí jednoduchá dostupnost podpory při řešení problémů.

5.1.2 PrusaSlicer

Výstupním souborem navrženého objektu je nejčastěji soubor s příponou STL, který reprezentuje objekt jako síť tvořenou trojúhelníky. Tento soubor není pro 3D tiskárnu přímo čitelný a je jej potřeba přeložit do G-code, podle kterého pak tiskárna vykonává jednotlivé pohyby a funkce. K tomuto překladu se používá řada SW označovaných jako slic3r. Při transformování modelů pro tuto diplomovou práci byl využíván PrusaSlicer, jelikož je přímo kompatibilní s vybranou 3D tiskárnou. Nástroj tohoto typu umí jednotlivé modely rozložit na tiskovou podložku a

podle zvolených parametrů vytvořit pokyny pro tiskárnu. Klíčovými parametry jsou pro každý tisk výška vrstvy určující detail, výplň spolu s počtem perimetrů určující mechanickou odolnost, a také parametr podpěr zvyšující pravděpodobnost úspěšnosti tisku při složitých tvarech. Množství nastavení, které je možné provést před samotným tiskem, je spousta a je možné je nalézt v dokumentaci[19] k oficiální verzi slic3r. Nástavba PrusaSlicer bohužel žádnou oficiální dokumentaci neposkytuje.

5.1.3 Prusa i3 MK3s

Tento blok je posledním krokem k vytvoření reálného modelu z virtuálního návrhu. Tisk částí robotu byl prováděn na Prusa i3 MK3s tiskárně, která se řadí mezi FDM tiskárny vytvářející produkt postupným přidáváním filamentu do vrstev. Tato tiskárna je nejrozšířenější uživatelskou tiskárnou na trhu. Její parametry jsou vypsány v tabulce č.11, další informace jsou dostupny online[20].

Tabulka 11: Parametry tiskárny Prusa i3 MK3s

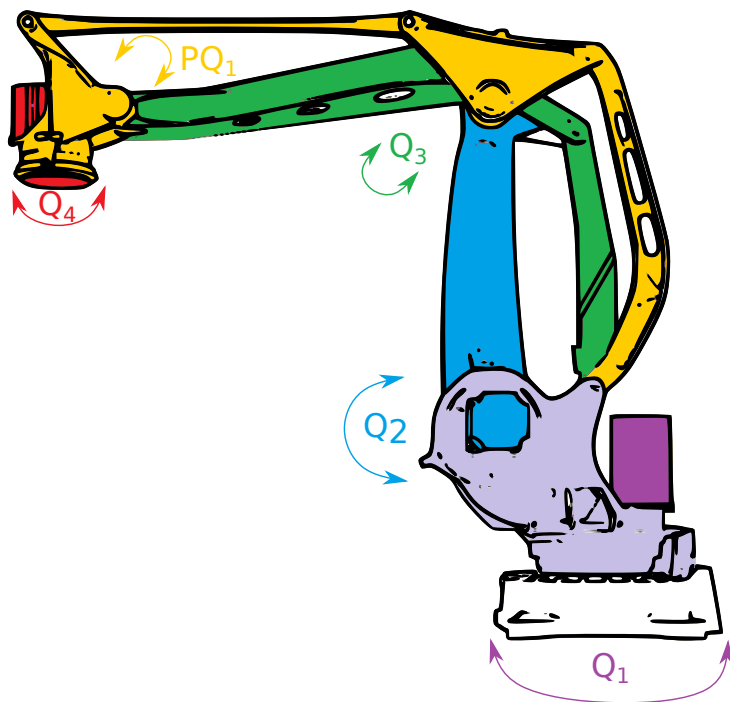
Parametr	Popis Velikost tiskové plochy
11.025cm ³ (25cm × 21cm × 21cm)	
Minimální výška vrstvy	0,05mm
Typ podložky	Magnetická PEI
Kalibrace osy Z	Automatická
Kalibrace osy X a Y	Momentová
Maximální rychlost pohybu	200 mm/s

5.2 Konstrukční část paletizačního robotu

Konstrukce paletizačního robotu je specifická oproti běžným manipulátorům. Hlavní rozdíl je v rozložení motorů, které nejsou součástí každého kloubu, ale jsou upevněny k základně. V běžném provedení jsou paletizéry se čtyřmi osami, avšak pro účely diplomové práce stačí pouze tři, tudíž je vypuštěna osa Q_4 rotující efektozem. Pohyb paletizéru je složitý pro představu, proto bylo využito nástroje Scene Viewer od firmy B&R, který umožňuje import robotu do 3D prostoru a zpřístupní jeho osy, se kterými je možné jednotlivě hýbat. Předlohou byl robot Comau PAL 260, na obrázku č.24, který je v prostředí programu předdefinován. Podle něj byl od základny až po efektor navrhnut nový model mechaniky paletizéru. Postupný návrh jednotlivých součástí je popsán v následujících podkapitolách.

5.2.1 Základna robotu

Návrh základny musí počítat s velkým zatížením, jelikož na ní jsou uchyceny všechny tři motory vážící dohromady okolo dvou kilogramů. První byl navrhnut úchyt pro přírubu motoru, která je vsazena do plastového dílu a přitažena šrouby s maticí velikosti M4. Nosná část je svedena a



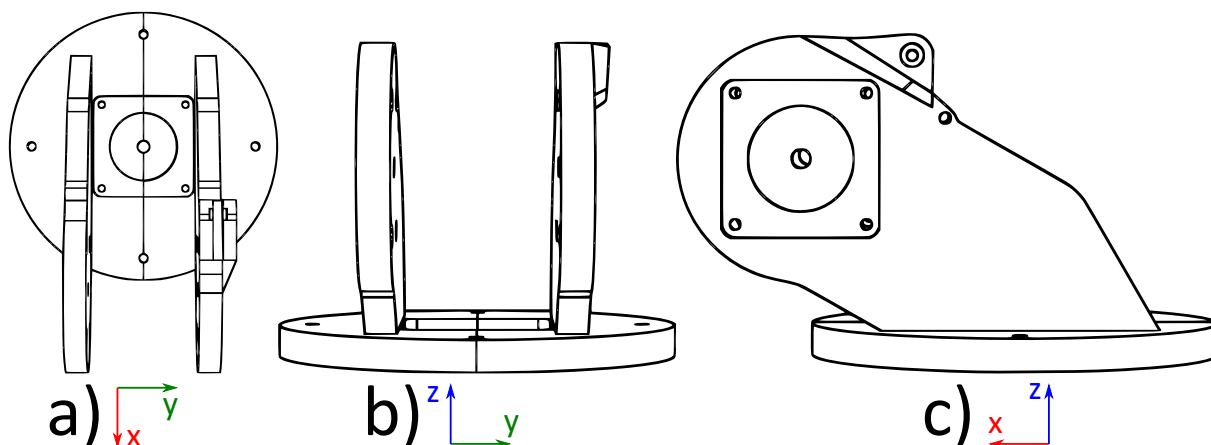
Obrázek 24: Comau PAL 260 s barevně odlišenými osami a jim příslušícím částem

zapuštěna do podstavce, ve kterém se základna bude otáčet, proto je její spodní část kruhová. Shora je viditelný úchyt pro motor osy Q_1 , zespodu jsou pak připraveny drážky pro vytisknuté kroužky axiálního ložiska. Na obrázku č.25c je viditelný úchyt pro stabilizační vertikální táhlo v nejvyšším bodě základny, pod kterým je připravená díra pro závitovou tyč velikosti M4, která prochází skrz oba pilíře a chrání tak motor Q_1 před nárazem ramene robotu. Skica navržené základny je na obrázku č.25.

Pro tisk byl zvolen materiál PETG, pro jeho mechanickou odolnost. Tisknuto bylo s výplní 40% a třemi perimetry. Možnost podpěr byla využita v části s vysokým sklonem pod motory Q_2 a Q_3 . Tisk poslední verze trval dva dny a spotřebovalo se celkem sto metrů filamentu. Během celého procesu byly vytištěny celkem tři modely.

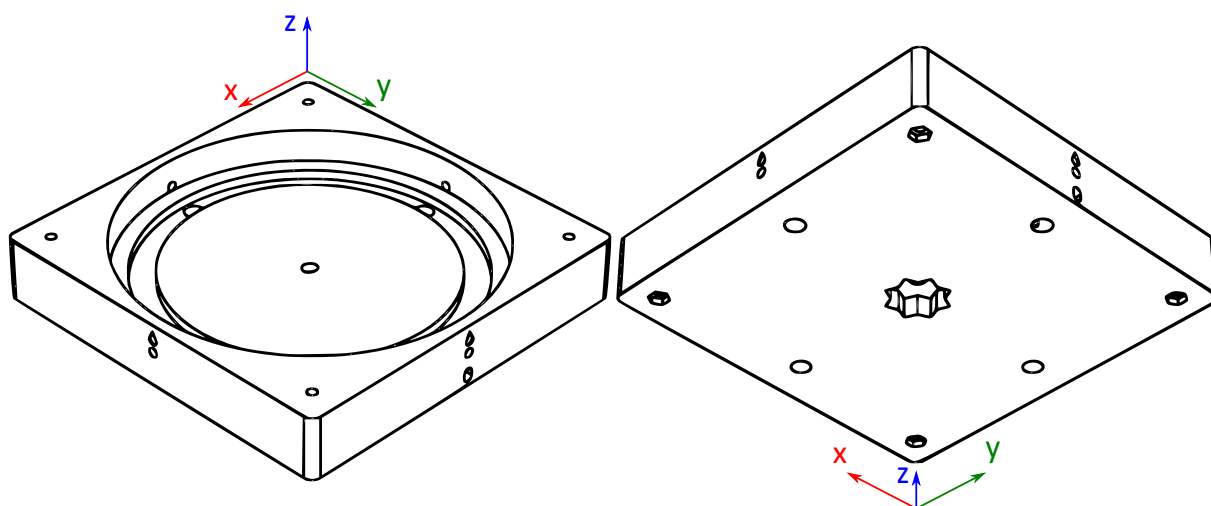
5.2.2 Podstavec

Tato část je pomocí šroubů pevně přichycena k podložce, na které je robot umístěn. Do kruhového výřezu je vložen kroužek axiálního ložiska a základna robotu. Ze spodní strany je vsunuta hvězda z oceli pro rozložení síly motoru, jehož hřídel prochází středovou dírou podstavce. Hvězda obsahuje díru pro červík, pro dotažení hřídele, k čemuž slouží oválný otvor vedený z boku až do středu tak, aby bylo možné prostrčit imbusový klíč. Ve středu každé ze čtyř stran je kruhová díra se symbolem kapky pro prostrčení aplikátoru grafitového spreje na mazání axiálního ložiska. Skica podstavce je na obrázku č.26.



Obrázek 25: Skica navržené základny: a) Pohled shora, b) Pohled zepředu, c) Pohled zleva

Pro tisk byl zvolen materiál PETG s vysokou mechanickou odolností. Tisknuto bylo s výplní 40% a třemi perimetry bez podpěr. Tisk poslední verze trval 1 den a 16 hodin a spotřebovalo se 90 metrů filamentu. Vytisknuty byly celkem dva modely.



Obrázek 26: Skica navrženého podstavce

5.2.3 Axiální ložisko

Při otáčení okolo osy Q_1 vzniká tření mezi podstavou a podstavcem, proto je vytisknuto a vloženo axiální ložisko s 4mm kuličkami. Tento typ ložisek je velmi drahý, a proto bylo navrženo specifické řešení s vnějším rozměrem 135,76mm, vnitřním rozměrem 115,76mm a výškou 9mm. Model je potřeba vytisknout dvakrát, aby bylo složeno jedno celé ložisko. Mezi dva kroužky se vleze celkem 66 kuliček. Ložisko je vytištěno z materiálu PETG pro jeho vysokou mechanickou odolnost, jako podpora snížení tření slouží grafitový sprej, který vytvoří jemný kluzký film na povrchu materiálu. Skica a reálný výsledek v podstavci je viditelný na obrázku č.27.

Tisk probíhal opět při nastavení výplně na 40%, s třemi perimetry, bez podpěr. Tisk dvou kusů trval 5 hodin a spotřebovalo se při něm 10 metrů filamentu. Vytisknuty byly pouze dva kusy, které jsou použity ve finálním modelu.



Obrázek 27: Navržené axiální ložisko. Vlevo skica, vpravo reálný tisk vsazený do podstavy

5.2.4 Rameno osy Q_2

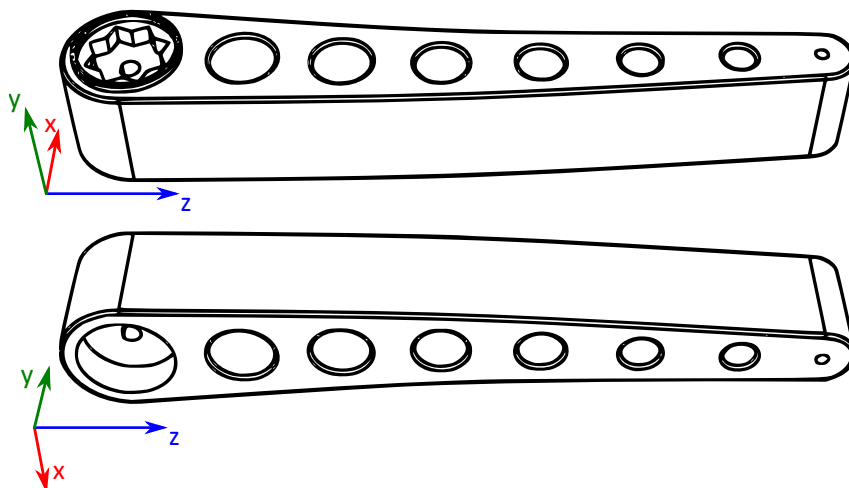
Motor osy Q_2 je upevněn na jednom z pilířů základny a jeho osa prochází až do ramene na obrázku č.28. Osa je uchycena v ocelové hvězdě vsazené do boku ramene a červík, který zpevní uchycení k hřídeli osy, je dostupný imbusovým klíčem ze spodní strany ramene. Druhý bok má v ose otáčení velkou díru pro ložisko, do kterého je uchyceno táhlo motoru Q_3 . Tenký konec slouží k připojení horizontálního ramene (předloktí) robotu přes závitovou tyč velikosti M4. Kruhové otvory skrz model mají za úkol šetřit materiál při tisku, jelikož rameno je dostatečně tuhé i v tomto rozvržení.

Tisknuto bylo z materiálu PETG, pro jeho mechanickou odolnost s výplní 40% a třemi perimetry s podpěrou v místě pro uložení ložiska. Tisk trval 24 hodin a spotřebovalo se 45 metrů filamentu. Vytisknuty byly tři modely, finální rameno je prodlouženo o dva centimetry a je přidána ocelová hvězdicová vložka.

5.2.5 Táhlo osy Q_2 pro horizontální rameno (předloktí)

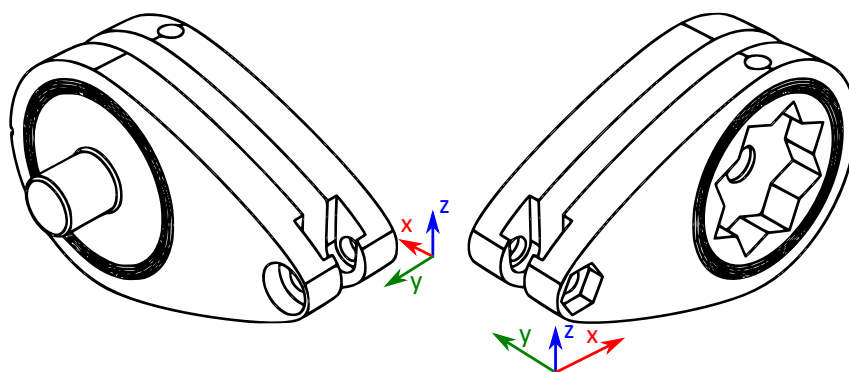
Stejně jako u osy Q_2 i tato osa prochází pilířem základny do ocelové hvězdy usazené v modelu. Na obrázku č.29 je viditelný kruhový otvor v horní části pro utažení červíku imbusovým klíčem. Druhá strana má vystouplý válec, který je vsazen do ložiska uloženého v rameni pro osu Q_2 . Střed táhla je vybrán pro pomocnou tyč upevněnou pomocí šroubu a matice rozměru M4.

Tisknuto bylo z materiálu PETG, pro jeho mechanickou odolnost s výplní 40% a třemi perimetry. Bylo využito podpěr z tiskové podložky pro strmé sklony a vystouplý válec. První tisk



Obrázek 28: Navržené rameno pro osu Q_2 . Nahoře viditelné místo pro ocelovou hvězdu, dole viditelné místo pro uložení ložiska.

byl ze dvou kusů, což se neosvědčilo, jelikož pevnost spojení nebyla dostatečně velká, proto byly další dvě úpravy tisknuty vcelku. Tisk trval 5 hodin a spotřebovalo se 9 metrů filamentu.



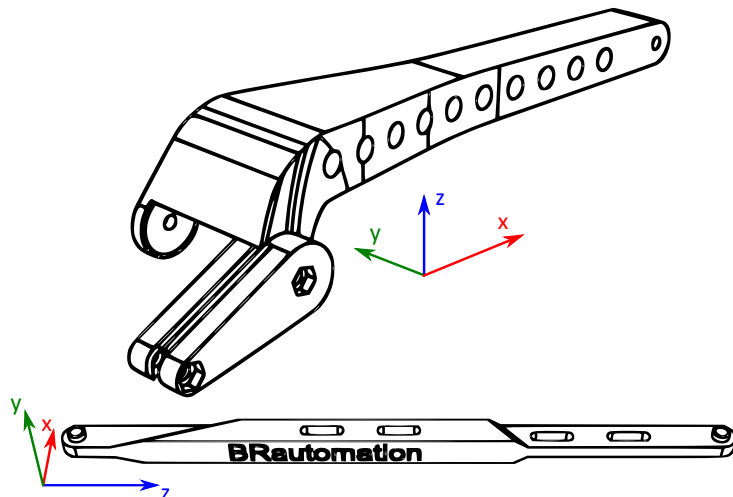
Obrázek 29: Navržené táhlo osy Q_3

5.2.6 Horizontální rameno (předloktí)

Tato část robotu je připevněna na rameni osy Q_2 a propojena pomocnou tyčí s táhlem. Vše je propojeno šrouby a závitovou tyčí velikostí M4 spolu se zápěstím, na kterém je efektor. Kruhové díry podél ramene šetří materiál při tisku bez toho, aniž by byla ovlivněna jeho tuhost. V nejnižším bodě ramene na obrázku č.30 je viditelné místo pro připojení pomocné tyče s vybráním, aby se mohlo rameno pohybovat bez omezení rozsahu. Pomocná tyč převádí pohyb z osy motoru až do kloubu Q_3 , uchycena je dvěma šrouby velikosti M4 a v prostřední části je rozšířena pro získání větší tuhosti. Oválná vybrání slouží k šetření filamentu a zrychlení tiskového procesu.

Rameno bylo tisknuto z materiálu PETG, pro jeho mechanickou odolnost se 40% výplně a dvěma perimetry. Využito bylo manuálních podpor v místě, kde by jinak bylo tisknuto do vzduchu, jelikož byl model na tisk pootočen okolo osy x o 180° . Tisk probíhal celkem 14 hodin a spotřebovalo se 28 metrů filamentu. Model ramene byl tisknut pouze jednou.

Pomocná tyč byla tištěna ze stejného materiálu, se stejným nastavením. Tisk probíhal celkem 2 hodiny a spotřebovalo se 5 metrů filamentu. Model byl tisknut třikrát.



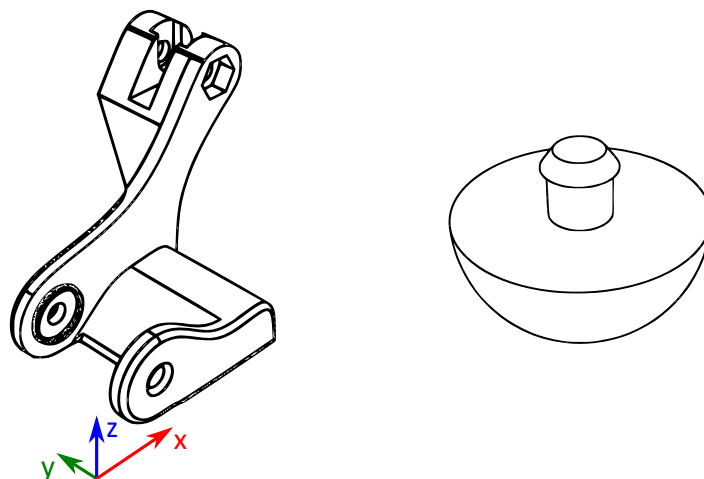
Obrázek 30: Navržená skica horizontálního ramene (předloktí) robotu nahoře a pomocná tyč dole

5.2.7 Zápěstí robotu a efektor

Mechanikou je díky pomocným tyčím předloktí robotu drženo vodorovně po celou dobu pohybu. Připojení pomocných tyčí je v horní části modelu pomocí šroubku a matky velikosti M4, podobně jako uchycení na předloktí robotu pomocí závitové tyče. Ze spodní strany je kruhová plocha pro efektor, který je navržen tak, aby se mohl zaklesnout do zápěstí pomocí zámku v podobě válce s rozšířeným koncem. Spojení je velice pevné i bez použití lepidel.

Zápěstí robotu, na obrázku č.31, je tisknuto z materiálu PETG, pro jeho mechanickou odolnost s výplní 40% a třemi perimetry. Při tisku je využito podpěr v místě pro připojení pomocné tyče. Tisk probíhal 4 hodiny a spotřebovalo se 5 metrů materiálu. Model byl tisknut jednou.

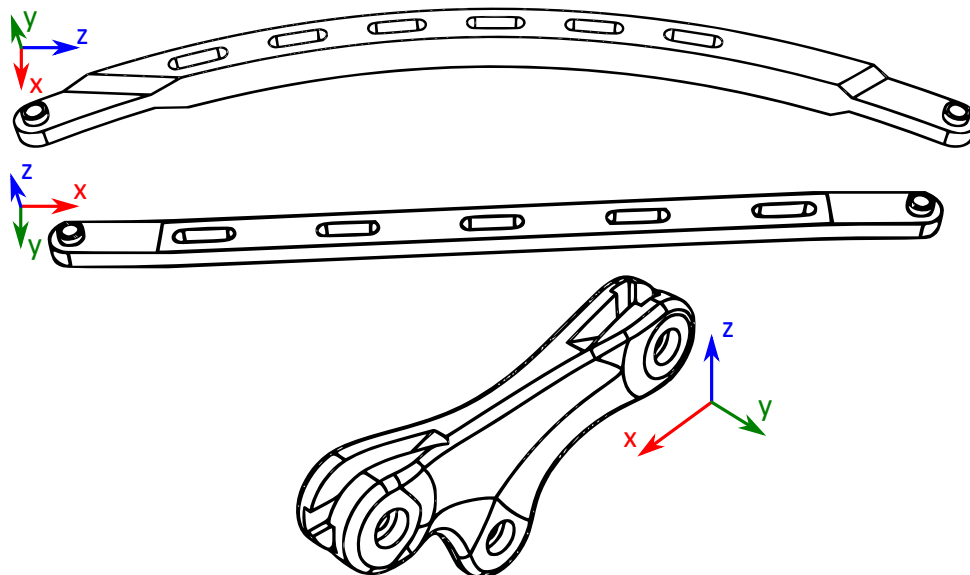
Efektor robotu byl tisknut z materiálu TPU, který má pro tisk velmi specifické nastavení parametrů. Jedná se o termoplastický materiál, který si po tisku zachovává své elastické vlastnosti. Výplň modelu je 70% pro větší tuhost, snahou bylo dosáhnout podobnosti s lidským prstem. Profil tisku byl zvolen jako pro materiál PETG, ale s upravenými rychlostmi pohybu, jelikož je potřeba tisknout pomaleji, aby se materiál nebortil. Rychlost byla nastavena podle dokumentace[21] na 25mm/s. Teplota podložky byla změněna na 55°C a teplota trysky na 230° . Rychlost ventilátoru je 100% pro chlazení filamentu. Podpěry nejsou při tisku využity. Tisklo se 35 minut a spotřebovalo se 80 centimetrů filamentu.



Obrázek 31: Navržená skica zápěstí (vlevo) a efektoru (vpravo)

5.2.8 Stabilizace efektoru

Stabilizace koncového bodu sériového řetězce robotu je provedena mechanicky. Výchozí bod je v jednom z pilířů podstavy, kde je uchycena pomocná zaoblená pomocná tyč vedoucí až k trojúhelníkovému přenašeči umístěnému na kloubovém spojení ramene a předloktí. Zaoblený tvar má pomocná tyč proto, aby se vyhnula kolizi s pilířem při natažení robotu do nejvzdálenějšího bodu. Přenašeč je spojen další pomocnou tyčí s efektem. Cílem tohoto mechanického spojení je udržet efektor ve vodorovné poloze v celém rozsahu pohybu. Veškeré komponenty použité k tomuto účelu jsou na obrázku č.32.



Obrázek 32: Stabilizační pomocné tyče a trojúhelníkový přenašeč

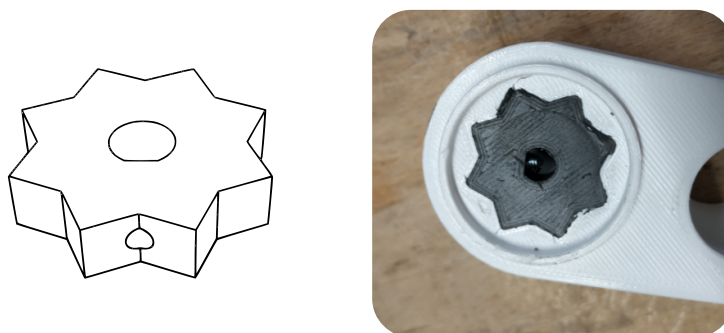
Tisk všech tří částí probíhal najednou z materiálu PETG, kvůli jeho mechanické odolnosti

s výplní 40% a třemi perimetry. Pomocné tyče tisknuty naležato nepotřebovaly podpěry, trojúhelníkový přenašeč byl tisknut v poloze jako na obrázku č.32, pro který byly potřeba podpěry kvůli ostrým sklonům. Tisk probíhal 9 hodin a spotřebovalo se 18 metrů filamentu. Každý kus byl vyroben dvakrát.

5.2.9 Hvězdicová vložka

Návrh této části reaguje na vzniklý problém s prvotním návrhem spojení plastových částí s ocelovou hřídelí tvaru D. Motor je při akceleraci tak silný, že se ve spojení s dílem protočil, čímž se díl zničil a nebyla zaručen pohyblivý spoj. Vznikl tedy model hvězdy, která je z materiálu, který nepodlehne síle motoru a rozloží moment na větší plochu. Návrh hvězdy je na obrázku č.33.

Hvězda byla nejdříve vytištěna z nejsilnějšího materiálu dostupného pro konvenční 3D tiskárny a sice CF-Nylon G3 CarbonX. Tento materiál je velmi náročný na tiskové podmínky, jako je vlhkost a teplota okolního prostředí, zároveň je vysoce abrasivní díky šupinám karbonu v nylonové struně. Tisk hvězdy trval 20 minut a spotřeboval 70 centimetrů filamentu. Celkem bylo vytisknuto pět hvězd, avšak ani z nejodolnějšího filamentu nevydržela nápor momentu hřídele, která se v hvězdě protočila bez problému.

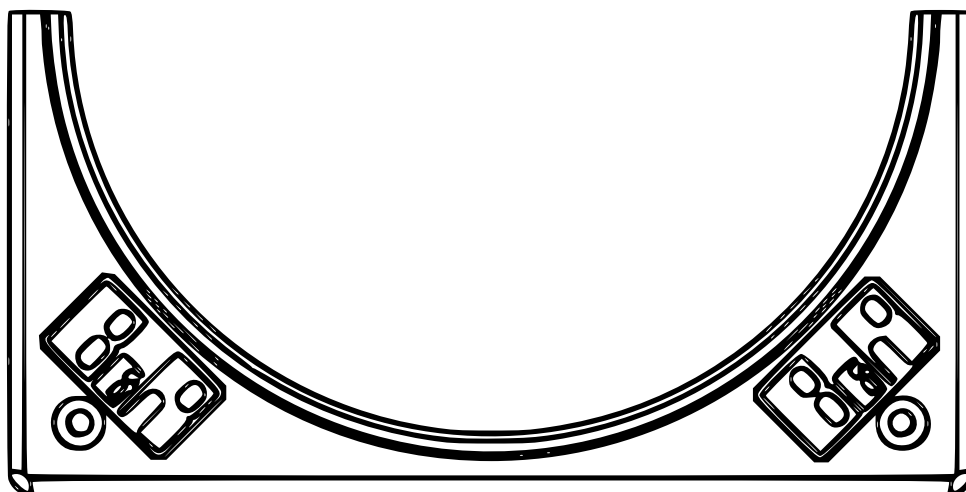


Obrázek 33: Skica vložky (vlevo), vsazená nylon-karbonová vložka v rameni robotu (vpravo)

Dostupné robustní řešení bylo využít laseru pro vypálení hvězdy z oceli. Pálení probíhalo na stroji Vanad KOMPAKT Laser z 6mm oceli. Vypáleno bylo přes dvacet kusů hvězd, než bylo dosaženo uspokojivého výsledku. Dále byla vyvrtána do každé z hvězd díra a závitníkem vytvořen závit pro červíka velikosti M3. Toto řešení pasovalo do dílů i hřídele dokonale a pomocí pojistné pasty bylo zajištěno proti povolení. Celý proces zabral 6 hodin práce na laseru a 2 hodiny drobných úprav.

5.2.10 Uzávěr základny

Tento díl udržuje podstavu zcela zasunutou do dílu podstavce. Jeho funkce ve výsledku je spíše estetická, jelikož hřídel je pevně chycená ocelovou hvězdou a nehrozí vypadnutí dílu podstavce ani uvolnění kuliček z ložiska mezi základnou a podstavcem. Skica uzávěru je na obrázku č.34.



Obrázek 34: Uzávěr základny

Tisknuto bylo z materiálu PETG pro jeho mechanickou odolnost a s výplní 40%. Tisk probíhal 1 hodinu a 30 minut, celkem se spotřebovalo 5 metrů filamentu.

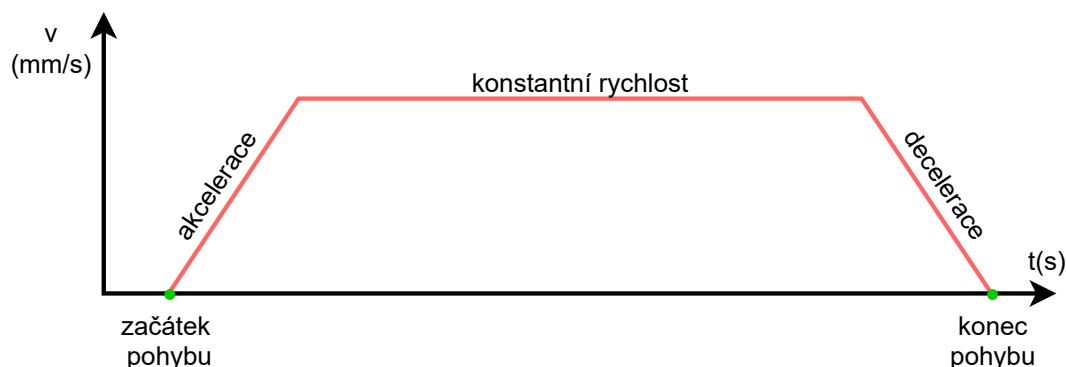
6 Návrh a realizace řízení

Tato kapitola se zabývá řízením navrženého modelu třemi zvolenými způsoby. První z nich je jednoduché řízení bez omezení akcelerace a bez interpolace nazývané taktéž jako řízení s RAMP módem. Druhým způsobem je řízení s omezením akcelerace bez interpolace realizované interní knihovnou firmy B&R nazývanou Motorky, která byla používána pro řízení krokových motorů. Třetím způsobem je řízení s omezením akcelerace s interpolací využívající nových funkcionalit SW balíku mappMotion.

Pro všechny tři způsoby řízení je využita stejná HW konfigurace jako na obrázku č.18.

6.1 Řízení bez omezení akcelerace bez interpolace

Tento způsob řízení je velmi primitivní a vychází z jednoduchého principu, kdy je snaha dosáhnout zadané polohy s nastavenou rychlostí. Akcelerace u tohoto řízení není limitována žádným parametrem, ale vyplývá z maximálního dodávaného proudu a dynamických vlastností soustavy motoru a mechaniky. Rychlostní profil se na konci pohybu skládá ze dvou ramp, jednou náběžnou a druhou sestupnou, jejichž sklon je dán limitem akcelerace. V tomto případě řízení by sklon ramp neměl být ovlivněn limitací akcelerace. Graf znázorňující tento průběh je na obrázku č.35.



Obrázek 35: Rychlostní profil režimu Ramp

Před samotným rozpohybováním motorů je důležité upravit HW konfiguraci celého systému. Karty X20SM1446-1 využívané k řízení krokových motorů mají několik možných konfigurací ve fyzické vrstvě, pro tento případ je nutno zvolit funkční model Ramp. Tím se zpřístupní veškeré nastavení, ty je potřeba pečlivě pročíst a nastavit podle požadavků systému a řízení. Další změny je nutno provést v konfiguraci procesoru, konkrétně pozměnit časování cyklických tříd a přidat jim příslušné programy.

6.1.1 Konfigurace modulů X20SM1446-1

Hlavní nastavení je prvním oddílem, ve kterém lze změnit hlídání modulu, které je vypnuto pro účely testování. Procesorová jednotka tedy nebude při vypnutí napájení motorů restartována do

servisního režimu. Dále je zapnuto rozšířené kontrolní slovo, což zpřístupní určité bity v kontrolním slově sloužící například pro nastavení absolutního nebo relativního polohování. Zobrazení zátěže motoru, neboli jeho momentu, je z důvodu ladění zapnuto. Generátor profilu pohybu je nastaven na cyklus 25ms.

Motorová nastavení jsou poměrně rozsáhlá, avšak nejdůležitější je nastavit procentuální hodnotu proudů z maximálních 5A, které je schopen modul motorům poskytnout. Toto nastavení je odlišné pro motor osy Q_1 a motory os Q_2 a Q_3 . Nastavení zřehledňuje tabulka č.12.

Limity rychlostí, akcelerace a decelerace se lehce liší. Osa Q_1 má slabší motor, proto je i její rychlostní limit menší. Větší rychlost znamená ztrátu kroků, jelikož hybnost robotu při rotaci přetlačí brzdou sílu motoru. Osa Q_2 a Q_3 mají stejnou motorovou výbavu, avšak kvůli zamezení kolize s konstrukcí robotu je potřeba, aby byla osa Q_2 lehce rychlejší než Q_3 . Limity jsou zřehledněny v tabulce č.13.

Ostatní nastavení jsou volitelná a pro základní pohyb nejsou potřebná. Lze v nich změnit například způsob získání domovské pozice. Díky možnosti sledování momentu a detekce ztráty kroku lze využít, nyní velice populární, momentové navádění na nulový bod, které odstraňuje ze systému koncové spínače. Provedení této funkcionality vyžaduje rychlost větší než 1 otáčka/sekundu. Dále je vhodné nastavit osám maximální a minimální limit pozice, nedojde tak ke kolizi s okolními předměty.

Tabulka 12: Nastavené proudy pro motory jednotlivých os konfigurace RAMP

Motor	Osa	Proud při		
		Stojícím motoru	Konstantní rychlosti	Akceleraci
80MPD3.600S014-01	Q_1	40% (2A)	100% (5A)	200% (10A)
80MPD5.600S014-01	Q_2 a Q_3	25% (1,25A)	100% (5A)	150%(7,5A)

Tabulka 13: Nastavené limity rychlosti a zrychlení

Motor	Osa	Proud při		
		Rychlost	Akcelerace	Decelerace
80MPD3.600S014-01	Q_1	250 $\frac{\text{mikrokroky}}{\text{cyklus}}$	250 $\frac{\text{mikrokroky}}{\text{cyklus}^2}$	250 $\frac{\text{mikrokroky}}{\text{cyklus}^2}$
80MPD5.600S014-01	Q_2	450 $\frac{\text{mikrokroky}}{\text{cyklus}}$	450 $\frac{\text{mikrokroky}}{\text{cyklus}^2}$	450 $\frac{\text{mikrokroky}}{\text{cyklus}^2}$
80MPD5.600S014-01	Q_3	400 $\frac{\text{mikrokroky}}{\text{cyklus}}$	400 $\frac{\text{mikrokroky}}{\text{cyklus}^2}$	400 $\frac{\text{mikrokroky}}{\text{cyklus}^2}$

6.1.2 Konfigurace procesoru X20CP0484

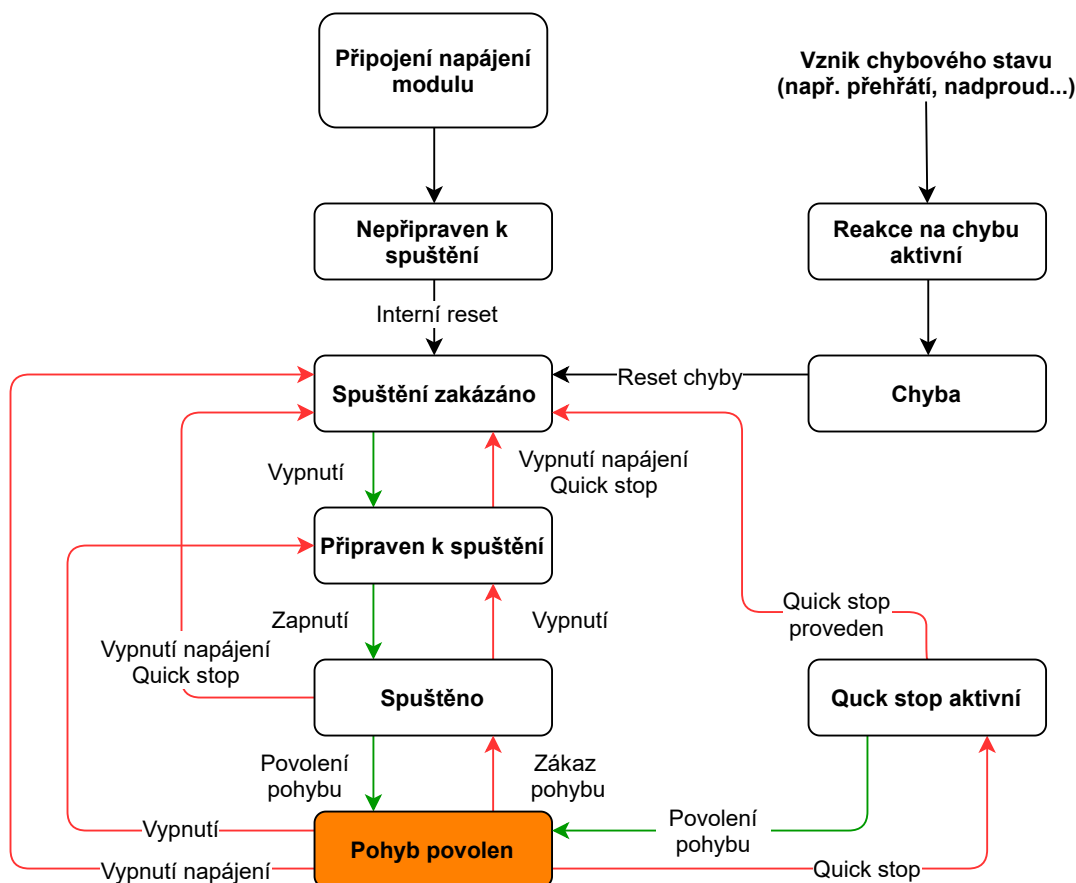
Procesor se na řízení nepodílí přímo, ale předává modulům X20SM1446-1 informaci o poloze, proto je velmi důležité nastavit správné časování cyklických tříd a systémového časovače. Komunikace mezi moduly a procesorem probíhá na vestavěné X2X sběrnici, kterou je potřeba nastavit jako systémový časovač z důvodů synchronizace dat. Změnou systémového časovače se zpřístupní volba interface, ten se musí shodovat s použitými zády procesoru a interface číslem v konfiguraci

fyzické vrstvy (např. X20BB52.IF6). Zvolením se automaticky vyplní doba cyklu interface a čas systémového tiků.

Program, který řídí karty by, měl být umístěn v cyklické třídě #1. Doba cyklu této třídy je v základním nastavení $10000\mu s$, což je potřeba změnit tak, aby se doba cyklu třídy shodovala s dobou cyklu interface. Tolerance času musí být nastavena na $0\mu s$.

6.1.3 Testování pohybu os pomocí monitorovacího módu

Po dokončení konfigurace jsou řídicí karty připraveny pohybovat s osami. Pro testování je vhodné použít monitorovací mód v Automation Studio, ve kterém lze přímo ovládat výstupy a číst vstupy karet. Je však potřeba znát stavový diagram pro zadání správné sekvence příkazů ke spuštění motorů. Stavový diagram je na obrázku č.36. Jsou v něm znázorněny stavy ve kterých se modul X20SM1446-1 může nacházet a příkazy, kterými lze stavy měnit.



Obrázek 36: Stavový diagram karty X20SM1446-1

Aktuální stav lze sledovat registrem MpGenStatus01. Status word, jak se nazývá tento registr, je bezznaménkový integer, který po převedení do binárního slova má 16 bitů. Každý má specifickou informační funkci. Jejich kombinace určuje aktuální stav ve stavovém diagramu. Pře-

hled stavů a funkcí je v tabulce č.14. Status word může být i rozšířený, pak budou použity i bity 12 - 15 pro specifickou funkci.

Tabulka 14: Status word

Status	Rezervováno	Interní limit	Cíl dosažen	Ovládání	Rezervováno	Varování	Spuštění zakázáno	Quick stop	Napájení povoleno	Chyba	Pohyb povolen	Spuštěno	Připraven ke spuštění
Bit	15-12	11	10	9	8	7	6	5	4	3	2	1	0
Nepřipraven ke spuštění	x	x	x	1	0	x	0	x	0	0	0	0	0
Spuštění zakázáno	x	x	x	1	0	x	1	x	0	0	0	0	0
Připraven ke spuštění	x	x	x	1	0	x	0	1	0	0	0	0	1
Spuštěno	x	x	x	1	0	x	0	1	1	0	0	1	1
Pohyb povolen	x	x	x	1	0	x	0	1	1	0	1	1	1
Quick stop aktivní	x	x	x	1	0	x	0	0	1	0	1	1	1
Reakce na chybu aktivní	x	x	x	1	0	x	0	x	0	1	1	1	1
Chyba	x	x	x	1	0	x	0	x	0	1	0	0	0
x =Llibovolný stav													

Podle aktuálního stavu lze přecházet do dalších stavů pomocí příkazů, které lze zadávat na registr MpGenControl01 karty X20SM1446-1. Vstup je opět bezznaménkový integer, který má v binárním slově 16 bitů. Každý samostatný bit je schopen ovládat některé funkce. Dohromady poté tvoří ovládací příkazy. Přehled příkazů, které lze použít, a jejich jednotlivých bitů je v tabulce č.15. Control Word může být i rozšířený, pak jsou použity i bity 4 - 6 pro specifickou funkci.

Dalším důležitým registrem pro ovládání karty je MpGenMode01, do kterého se zadávají módy, ve kterých se modul X20SM1446-1 bude pohybovat. Lze zde zkrácenou integer hodnotou volit způsob hledání nulového bodu, zvolit pohyb na pozici nebo konstantní rychlostí. Pokud tento vstup bude vždy nulový, osou nelze pohnout. Veškeré informace vychází z dokumentace [13].

6.1.4 Pohyb os pomocí programu

Programové ovládání využívá zkušeností získaných z předchozí kapitoly. Snahou je vytvořit co nejjednodušší a nejpřehlednější kód, proto byl napsán funkční blok ControlMotor, kterému se předávají pouze úhly natočení os a sleduje se jeho výstup Busy. Funkční blok vnitřně řeší hledání nulového bodu, přepočty na kroky, nastavuje vstupy a čte registry karet X20SM1446-1. Status word je použit v rozšířené verzi kvůli bitu 12 (Setpoint acknowledge), který informuje, zdali je

Tabulka 15: Control word

Status	Detekce ztráty kroku	Pozice enkodéru	Detekce chyby proudu	Reset varování	Měření ID motoru	Rezervováno	Kontrola proudu	Stop	Reset chyby	Specifikováno módem	Povolení pohybu	Quick stop	Povolení napájení	Spuštění
Bit	15	14	13	12	11	10	9	8	7	6-4	3	2	1	0
Vypnutí	x	x	x	x	x	0	0	x	0	x	x	1	1	0
Spuštění	x	x	x	x	x	0	0	x	0	x	0	1	1	1
Vypnutí napájení	x	x	x	x	x	0	0	x	0	x	x	x	0	x
Quick stop	x	x	x	x	x	0	0	x	0	x	x	0	1	x
Zákaz pohybu	x	x	x	x	x	0	0	x	0	x	0	1	1	1
Povolení pohybu	x	x	x	x	x	0	0	x	0	x	1	1	1	1
Reset chyby	x	x	x	x	x	0	0	x	↑	x	x	x	x	x
x = Libovolný stav ↑ = Náběžná hrana														

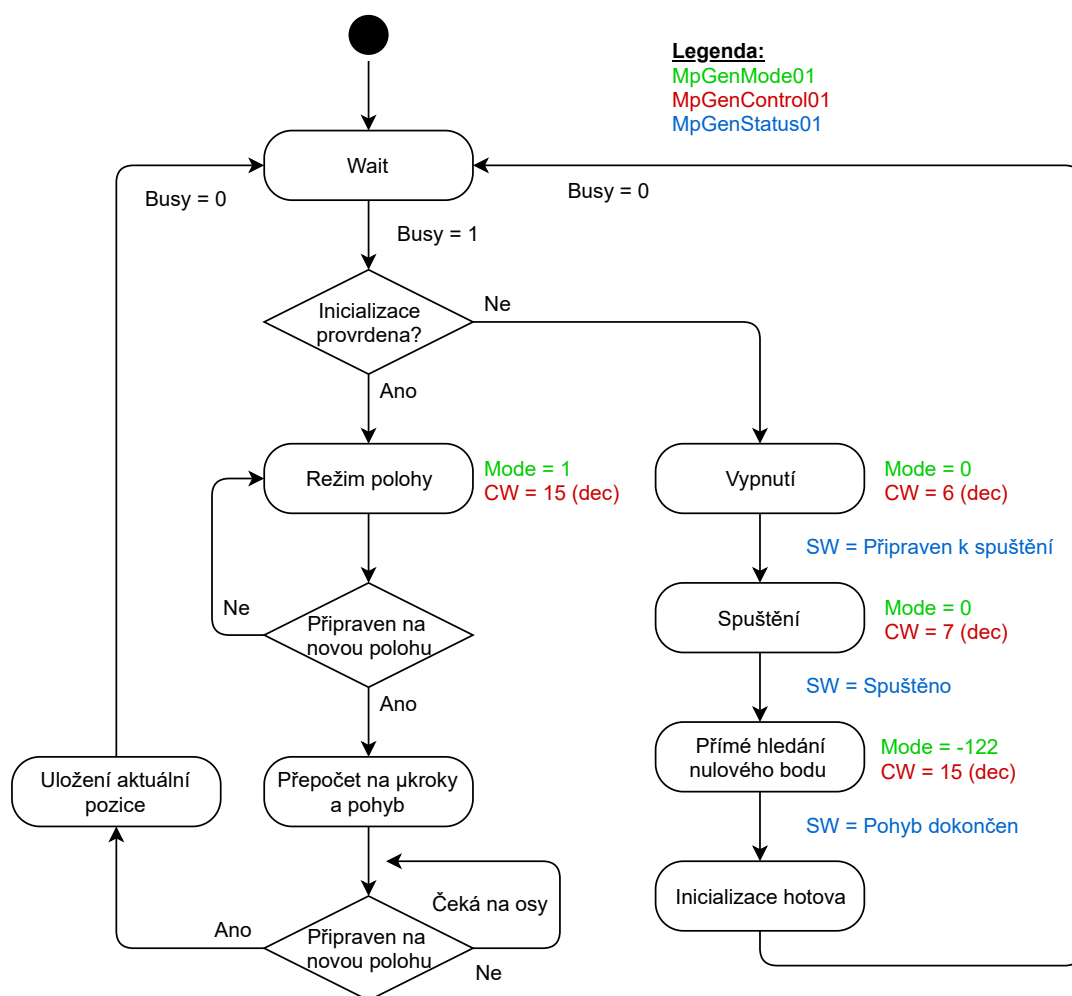
karta připravena na nastavení nové pozice. Control word je taktéž použit v rozšířené verzi, kvůli bitu 4 (New setpoint), kterým lze kartě říct, že může aplikovat nově zapsanou pozici na vstupu AbsPos01. Při čtení výstupů a nastavování vstupů karty se přistupuje vždy na specifický bit.

Program je psán v programovacím jazyce Structured text (IEC 61131-3 standard) z důvodu jednoduchého přistupování na jednotlivé bity slov.

Hlavní program je rozdělen na tři části. V inicializační části je nastavena výška dotyku na display pro měření opakovatelnosti a jednotky. Dále je nastaven stav hlavní CASE OF na provedení inicializace karet X20SM1446-1 a nalezení nulového bodu. Dokončení inicializační části je spuštěna cyklická část programu, ve které je jeden stavový diagram s 11 stavy. Prvně spustí inicializaci a nalezne robotu nulový bod pomocí funkčního bloku ControlMotor. Dále CASE OF čeká na povolení pohybu, jakmile jej dostane proběhne následujících devět stavů, v každém z nich je zadáno natočení osy v úhlech a čekání na potvrzení dokončení pohybu blokem ControlMotor. Po dokončení poslední pozice jsou uloženy informace o době cyklu a počtech proběhlých cyklů pro měření opakovatelnosti.

Funkční blok ControlMotor je taktéž psán ve strukturovaném textu a obsahuje dva CASE OF prvky. Jako první však jsou uloženy jednotlivé důležité bity do proměnných pro přehlednost. Následně je rozhodnuto, zdali bude probíhat inicializace a hledání nulového bodu, nebo normální režim polohy. Při prvním případě proběhne sekvence příkazů s využitím přímého nalezení nulového bodu, což znamená, že pozice, ve které se právě osy nachází, je nulovou pozicí. Při režimu polohy se sleduje stav bitu 12 v registru informujícím o statusu karty. Jakmile je tímto

bitem potvrzeno, že může být zapsaná nová poloha, přepočtou se uživatelem nastavené úhly na mikrokroky a zapíše se do registru AbsPos01. Pohyb se neprovede dokud není povolen bitem 4 v kontrolním slově. Jakmile je pohyb dokončen, stavový diagram se přesune do stavu, kdy čeká na novou polohu. Funkční blok ControlMotor je znázorněn stavovým diagramem na obrázku č.37.



Obrázek 37: Stavový diagram programu Ramp

6.2 Řízení s omezením akcelerace bez interpolace

Narozdíl od předchozího způsobu řízení, tento již umožňuje programově limitovat akceleraci pohybu jednotlivých os. V práci je použit, jelikož je elegantní možností, jak pomocí automatů B&R jednoduše řídit krokové motory. Jedná se o řešení pomocí knihovny nazvané Motoriky vyvinuté brněnskou pobočkou firmy B&R, která umí řídit krokové motory, frekvenční měniče a stejnosměrné motory. Verze knihovny V2.21 umožnila použití na ARM procesorech. Dříve ji bylo možné použít s DS kartami, které se používaly pro řízení krokových motorů, nástupcem se staly karty SM určené přímo pro tyto aplikace.

Stejně jako v předchozím případě je potřeba správně nakonfigurovat karty X20SM1446-1 a procesor X20CP0484. Vše je usnadněno pomocí help souboru vytvořeného ke knihovně Motorky, který prochází konfiguraci krok po kroku. Po správné konfiguraci je k dispozici vzorový kód, s jehož pomocí je možné provést základní pohyby os a postupně odladit parametry, následně je možné sepsat program v jednom z podporovaných jazyků. Konfigurace procesoru není v této kapitole zmíněna, jelikož se shoduje s konfigurací v kapitole 6.1.2.

6.2.1 Konfigurace modulů X20SM1446-1

V systému jsou zapojeny tři moduly X20SM1446, každý pro jednu osu, přičemž osa Q_1 je se slabším motorem a Q_2 s osou Q_3 mají stejné typy nejsilnějších krokových motorů z řady NEMA23 firmy B&R. Konfigurované parametry mají karty společné až na nastavení proudů, které se liší pro osu Q_1 .

V první řadě je v hlavním nastavení vypnut dohled nad kartou pro ladění, aby se zabránilo restartu CPU do servisního módu s každým vypnutím napájení karet. Vypnuto je také zobrazení zátěže, neboli momentu motoru, jelikož tato hodnota pro tento způsob řízení není potřeba.

Následující konfigurace přímo ovlivňují chování modulu. Tři následující nastavení se týkají SDC karty, který povoluje více bitů pro získání informací o kartě a zároveň kontroluje zdali byly obdrženy správné hodnoty pro nastavení rychlosti. Tato funkcionality je pevně zapnutá a nelze ji změnit. Mezi důležitá nastavení patří hlavně velikosti proudů, stejně jako u předchozího způsobu řízení se liší s použitým typem motorů. Hodnoty jsou zobrazeny v tabulce č.16. Oproti předchozímu způsobu řízení je nyní možné nastavit kartám poměry jednotek na reálné ose. Konkrétně se volí počet plných kroku na jednu otáčku motoru, počet jednotek na straně zátěže s informací kolik otáček musí motor vykonat, aby se posunul o daný počet jednotek na zátěži a také se nabízí možnost nastavit rozlišení enkodéru na otáčku.

Tabulka 16: Nastavené proudy pro motory jednotlivých os konfigurace Motorky

Motor	Osa	Proud při		
		Stojícím motoru	Konstantní rychlosti	Akceleraci
80MPD3.600S014-01	Q_1	40% (2A)	100% (5A)	150 (7,5A)%
80MPD5.600S014-01	Q_2 a Q_3	25% (1,25A)	100% (5A)	150 (7,5A)%

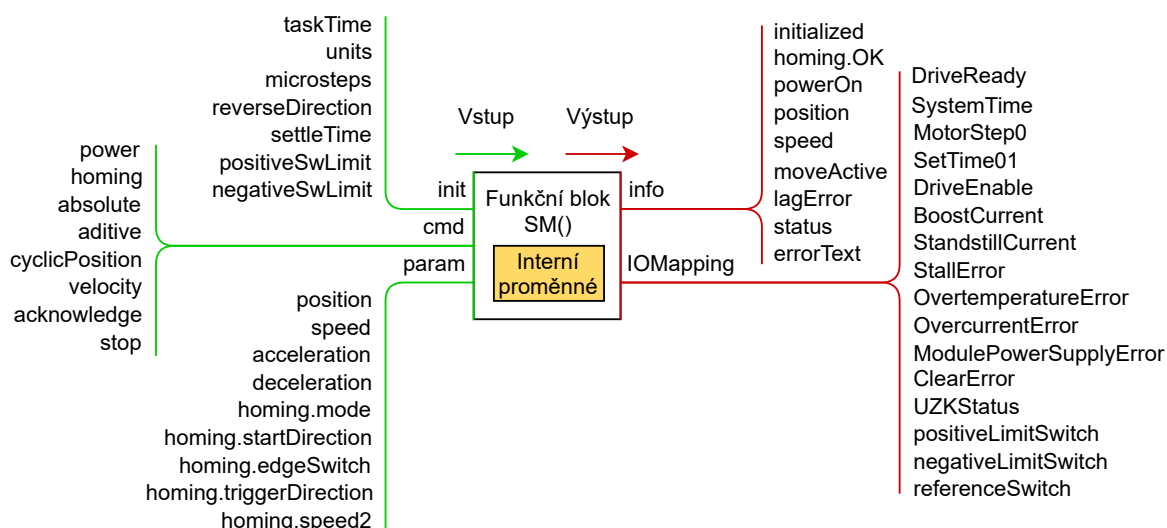
Doplňujícími možnostmi jsou limity kontroly ztráty kroku, hodnoty pro nastavení řízení v závislosti na proudu a také informace o použitém enkodéru. Tyto funkce jsou pouze doplňující a hýbat s osami lze i bez jejich změny.

6.2.2 Funkční blok SM() a vzorový kód

Knihovna Motorky obsahuje ve verzi v2.23.0 čtyři ovládací funkční bloky, přičemž každý z nich je určen pro jiný druh modulu připojeného k procesoru. Využity jsou moduly X20SM1446-1, proto je použit funkční blok s názvem SM. Před samotným programováním pohybu je potřeba navázat

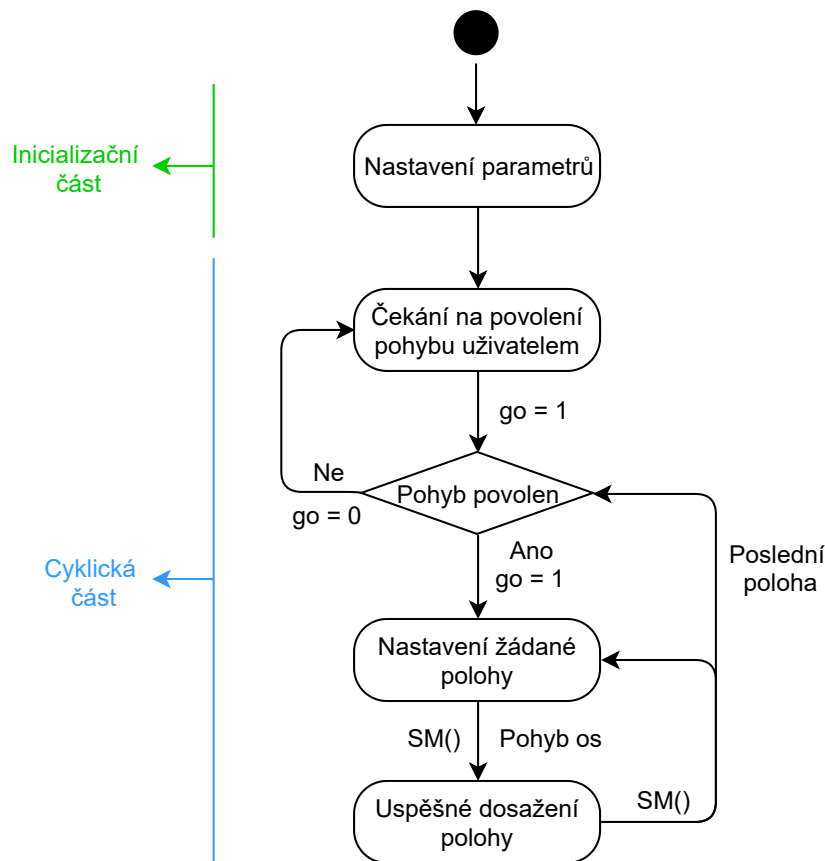
výstupy IOMapping z funkčního bloku na fyzické výstupy a vstupy karty i procesoru. Knihovna využívá systémový čas procesoru pro synchronizaci s cyklem X2X sběrnice a z modulu pro řízení využívá informace o přehřátí a nadproudu v motoru, naopak pak posílá informace o módu, krocích, proudu a dokáže resetovat chybové stavy. Vše je přehledně popsáno v dokumentaci[22] přiložené ke knihovně.

Nyní je možné začít psát program pro pohyb motorů. Důležité je vytvořit jej tak, aby běžel v cyklické třídě #1, jelikož ta je časem synchronizovaná s X2X sběrnicí. Inspiraci kódu lze najít ve vzorových programech, které jsou součástí balíku knihovny. Programová struktura začíná inicializační částí, kde jsou použity vstupy struktury init funkčního bloku. Definuje se zde čas cyklické třídy, ve které program běží, otočení směru otáčení osy, velikost filtru nastavené polohy a SW limity os. Důležitým inicializačním parametrem jsou jednotky, ve kterých je programováno. Velikost této hodnoty udává jednu otáčku motoru, například aplikace tříosého paletizéru pracuje v této práci s úhlovými jednotkami ve stupních, tudíž jedno otočení je rozděleno na 360 jednotek. Struktura param slouží k definici parametrů pohybu. V inicializační části programu je využita pro nastavení limitů akcelerace, decelerace a rychlosti. Lze ji měnit také v cyklické části programu. Veškeré prvky vstupních a výstupních struktur jsou na obrázku č.38.



Obrázek 38: Vstupy a výstupy funkčního bloku SM

Cyklická část programu obsahuje stavový automat, kterým postupně prochází. Nejprve čeká na start pohybu od proměnné go, kterou nastaví uživatel, poté postupně prochází všechny kroky, které vždy mají stejnou posloupnost a počet jejich opakování závisí na množství poloh, které osy musejí dosáhnout během pohybu. Nejdříve je modulům poslána žádaná poloha a pak je zavolán funkční blok SM. Jakmile se stavovému automatu dostane informace o úspěšném dosažení pozice, zadává pozici novou a cyklus se opakuje až do poslední polohy, následně je zkontrolováno, zdali proměnná go je stále ve stavu logické 1, který povolí zopakování celého cyklu. Průběh programu je znázorněn pomocí stavového diagramu na obrázku č.39.



Obrázek 39: Stavový diagram programu s využitím funkčního bloku SM

6.2.3 Finální program pohybu os

Výsledný program vychází ze vzorového kódu. Přidány jsou další dva funkční bloky SM, jelikož každý z modulů X20SM1446-1 musí být ovládán právě jedním blokem. Inicializace se nijak neliší, kromě invertování směru pohybu osy Q_2 , kvůli jeho způsobu uchycení a ulehčení pochopení směru pohybu při programování. Cyklická část programu obsahuje nejprve volání všech tří funkčních bloků SM a přechází do stavového automatu. Ten začíná kontrolou inicializace modulů následovanou zapnutím napájení motorů. Pokud je potvrzeno napětí na motorech, tak je přikročeno k nastavení domovské pozice. Ta je volena přímou metodou, tudíž aktuální pozice os je taktéž jejich nulovým bodem. Úspěšnost tohoto procesu je ověřena a je přikročeno k spuštění pohybu os pomocí dovustavové proměnné. Proces zpracování nastavené polohy je stejný jako ve vzorovém kódu popsaném v kapitole 6.2.2 a zobrazeném ve stavovém diagramu na obrázku č.39.

6.3 Řízení s omezením akcelerace s interpolací

Základem tohoto řízení je SW balík mapp Motion, která je volitelnou součástí programu Automation Studio. Knihovna používá pokročilé algoritmy k výpočtu pohybu os tak, aby byly dodrženy všechny zadané limity (včetně akcelerace) a zároveň umožňuje programovat pohyb koncového

bodou robota v kartézském systému souřadnic. Konceptem je zjednodušit programování systémů s jednou a více osami pomocí čtyř dostupných aplikačních balíčků (mapp Robotics, mapp Axis, mapp CNC, mapp Trak) obsahující předprogramované funkcionality, které je potřeba správně nakonfigurovat. Tato aplikace využívá aplikační balíček mapp Robotics. Další výhodou je sjednocení celého systému po HW stránce, kdy procesor komunikuje s modulem řízení, nejčastěji pomocí sběrnice POWERLINK, ten pak zajišťuje pohyb připojených os. Výjimkou jsou moduly komunikující po X2X sběrnici, jako právě X20SM1446-1 použitý v této práci. Specifikace a výrobce připojených motorů mohou být volitelné, shodovat se pouze musí jejich typ s použitým modulem řízení, což umožňuje výměnu motoru bez nutnosti složité změny programu nebo konfigurace systému. Řešení mechatronických systémů, jejich topologií, typů motorů a ladících programů je popsán v školícím manuálu[23] k mapp Motion komponentě.

Následující kapitoly popisují konfiguraci celého systému a program vytvořený pro aplikaci tříosého paletizéru využívající komponentu mappMotion verze 5.9.0. Konfigurace procesoru není v této kapitole zmíněna, jelikož se shoduje s konfigurací v kapitole 6.1.2.

6.3.1 Konfigurace modulů X20SM146-1

V konfiguraci systému jsou použity tři moduly řízení, pro každou osu jeden a každým má svou konfiguraci. Tato konfigurace je stejná pro všechny moduly. Ačkoli se může jevit, že se velmi podobá konfiguraci v předešlém způsobu řízení zmíněném v kapitole 6.2.1, není tomu tak, jelikož tato konfigurace využívá verze 2.2.0.0 firmware karet. Liší se například v nastavení proudů pro tři krokové motory, které se udávaly v procentech, nyní se však udávají v základní jednotce proudu. Omezení proudu vinutím při stojícím motoru, jeho akceleraci a konstantní rychlosti je v tabulce č.17. Dále je vypnut dohled procesoru nad kartou, tím se zamezí restartování procesoru do servisního módu v případě odpojení napájení modulů. Velmi důležitým nastavením je reference na osu vytvořenou v následující kapitole.

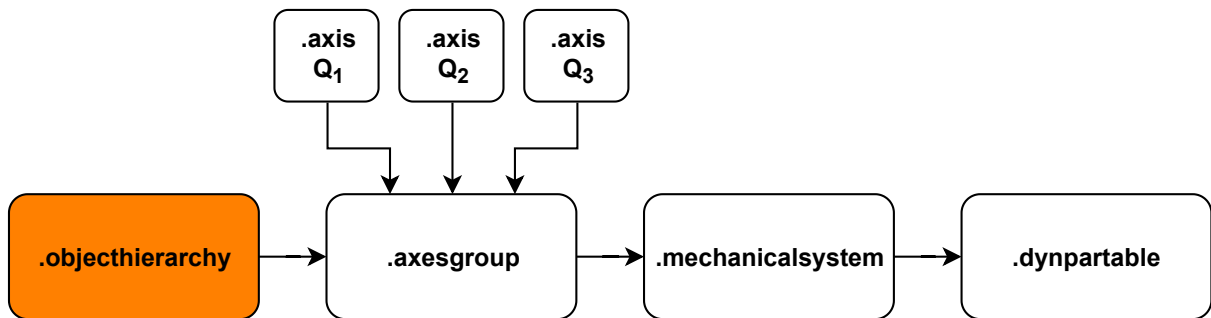
Tabulka 17: Nastavené proudy pro motory jednotlivých os konfigurace mapp Motion

Motor	Osa	Proud při		
		Stojícím motoru	Konstantní rychlosti	Akceleraci
80MPD3.600S014-01	Q_1	1A	5A	6.5A
80MPD5.600S014-01	Q_2 a Q_3	1A	2.5A	4A

6.3.2 Konfigurace mapp Robotics

Funkce, které nabízí mapp Robotics, jsou například monitorování pracovního prostoru, ruční ovládání robotu a spousty dalších, jsou dostupné pouze za předpokladu správného nakonfigurování skupiny os a mechanického systému. Robot, který je v této práci konfigurován, se jmenuje 4AxesRoboarmA a obsahuje v sobě veškeré důležité konfigurační soubory. Nejprve je však za-

potřebí založit hierarchii objektu skupiny os. Celý řetězec postupné konfigurace je na obrázku č.40



Obrázek 40: Řetězec konfigurace mapp Robotics

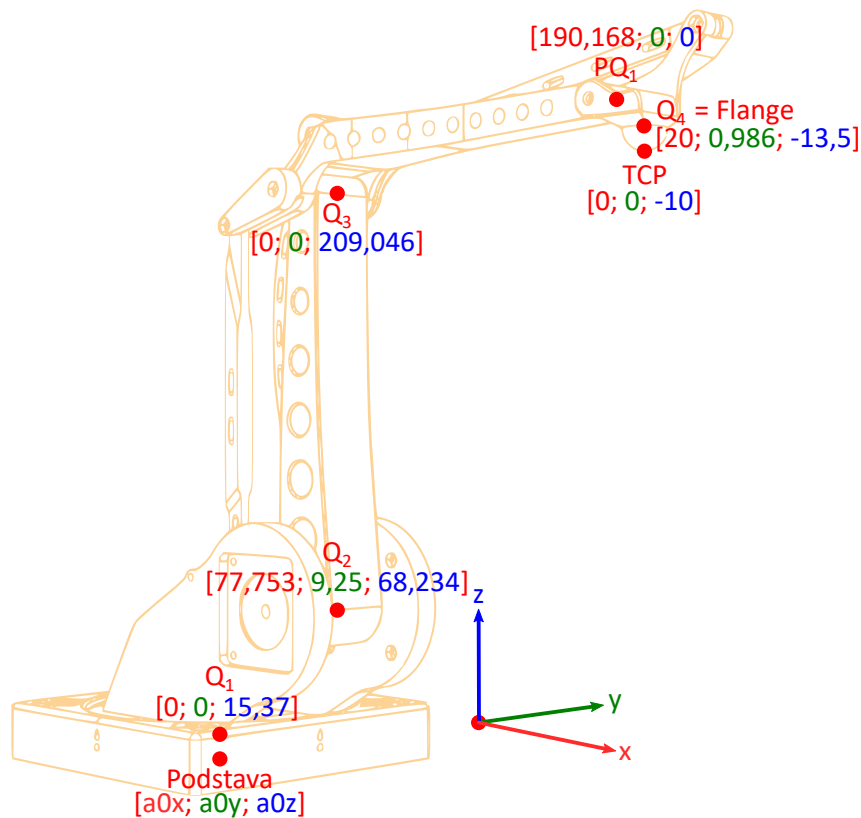
Object hierarchy je první soubor, který je potřeba přidat do složky mappMotion v Configuration view programu Automation studio. Slouží jako globální definování jednotek osových systémů, popisu rotace a jejich globálního souřadnicového systému. Jednotky, ve kterých je udáván pohyb os je nastaven na milimetry pro vzdálenost a na stupně pro úhel. Popis rotace mění chápání otáčení v prostoru okolo os, nastaven je Tait Bryan, jelikož je nejbližší lidskému chápání prostoru. V globálních souřadnicích je pak navázána skupina os, kterou je potřeba vytvořit z jednotlivých os.

Soubor s příponou axis v sobě obsahuje 4 osy, které se musí navázat jako reference do konfigurace modulů X20SM1446-1. V každé z os je možné nastavit její limity polohy, rychlosti, akcelerace a decelerace. Taktéž je možné zvolit jednotky, ve kterých má osa operovat, jejich rozlišení a směr, ve kterém se osa otáčí. V případě potřeby je možné určit hodnotu limitu jerk a momentu. Osy operují ve stupních s rozsahem $\pm 180^\circ$, rychlost os Q_2 a Q_3 je omezena na $1500^\circ/s$, pro osu Q_1 pak $1200^\circ/s$. Akcelerace a decelerace je pro osy Q_2 a Q_3 omezena na $800^\circ/s^2$, pro osu Q_1 pak na $600^\circ/s^2$. Tato nastavení platí pro všechny tři reálné osy s vypnutým limitem momentu a hodnoty jerk. Reálný model robotu využívá pouze tři osy, proto je čtvrtá definovaná jako virtuální s odlišnými parametry nastavenými na vysoké hodnoty, aby nezpomalovala v interpolovaném pohybu ostatní osy. Rozsah rotace virtuální osy je $\pm 1000^\circ$, limit rychlosti je $10000^\circ/s$ a akcelerace s decelerací je $10000^\circ/s^2$.

Skupina os je hlavní rozdíl oproti předešlým dvěma způsobům řízení, díky tomuto spojení se každá osa pohybuje v závislosti na ostatních. Taktéž se v tomto bodě konfigurace spojují veškeré soubory, jako jsou mechanické systémy, nebo rozšiřující funkcionality os (například jog, nebo čtení G-Code programů). Jméno skupiny je důležité, jelikož se následně referencuje z programu. V konfiguračním okně je klíčové zvolit o jaký typ skupiny os se jedná, použita je volba os pohybujících se po vygenerované trase. Následně se připojují jednotlivé osy z předešlého kroku a dávají se jim jména pro lepší přehlednost. Po vytvoření mechanického systému je potřeba jej zde připojit, podobně jako rozšiřující funkce. V základním nastavení se pak mění pouze plánování trajektorie, kde se nastavují časy potřebné pro plánování trasy a výpočet časového

zpoždění. Jelikož se nabízí možnost automatického nastavení, je toho využito a procesor si tyto časy získává sám podle potřeby. V tomto bodě konfigurace lze vyzkoušet pohyb osami, pro interpolovaný pohyb je však potřeba pokračovat dále návrhem mechanického systému.

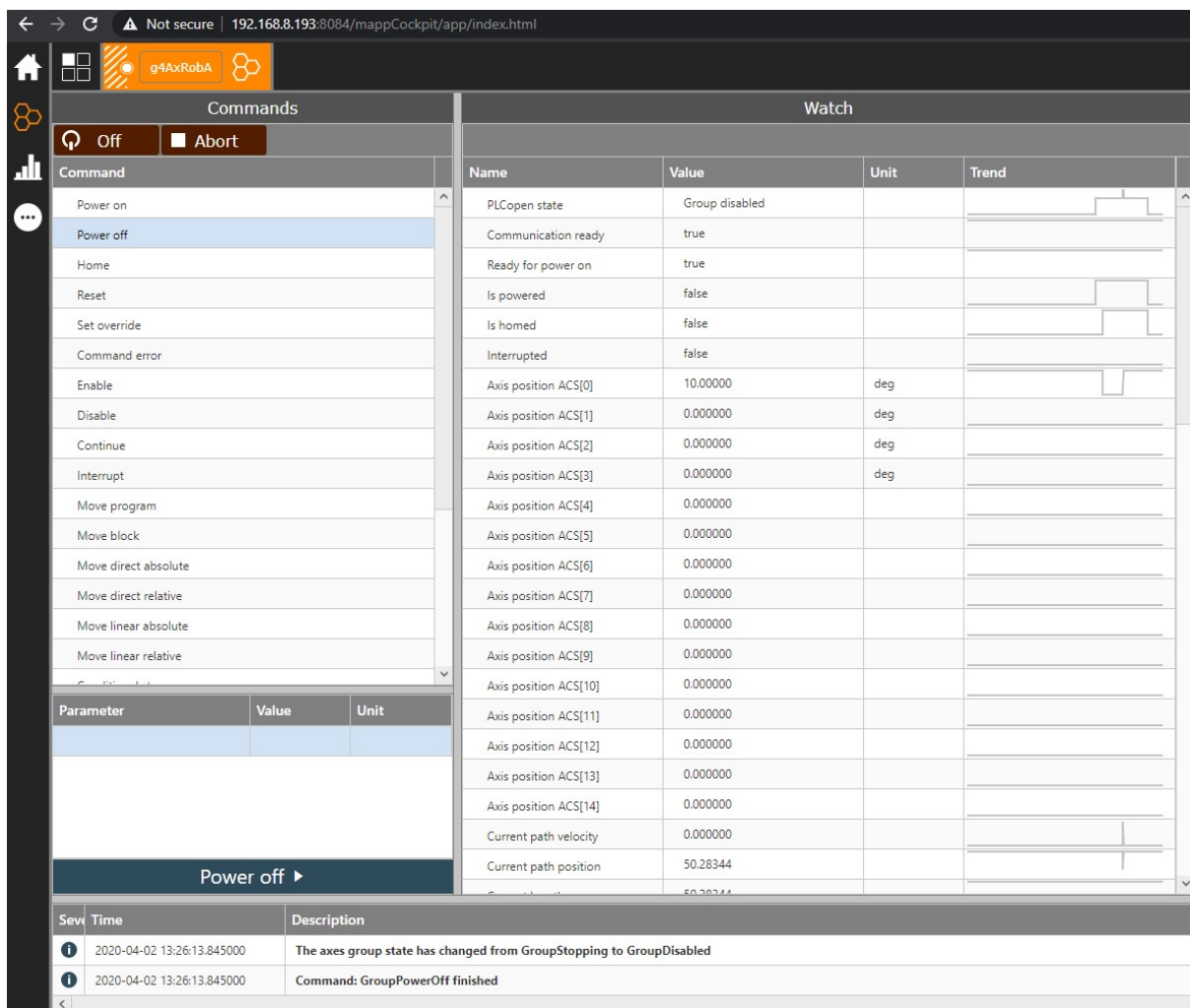
Mechanický systém zajistí správný výpočet nulového bodu MCS. Je potřeba mechanický systém pojmenovat a propojit ho s skupinou os. Následně jsou nataveny jednotlivé translace mezi osami. Postup vychází z popisu robotu složeného ze 4 os, který je dostupný v help souboru programu Automation Studio s mapp Motion verze alespoň 5.9.0. Jednotlivé translace jsou zapísány podle obrázku č.41, na kterém je vyobrazena skica reálného modelu paletizačního robotu s vyznačenými osami a jejich posunem vůči sobě. Využito je možnosti otočit smysl rotace osy Q_3 , taktéž jsou zde pojmenovány osy souřadnicového systému jako X, Y, Z zastávající reálné osy a C zastávající virtuální osu. Pomocí mechanického systému je možnost hlídat kolizi robotu do sebe sama, k tomu se ale musí nakonfigurovat přesné rozměry robotu, které z důvodu jeho složitosti není možné zadat s přesností tak, aby neovlivňovaly systém negativně při interpolovaném pohybu. Použitá kinematika robotu taktéž nutí použít funkci vazby pro osy Q_2 a Q_3 , které se svým pohybem jednoznačně ovlivňují.



Obrázek 41: Translace jednotlivých os mechanického systému

6.3.3 Testování pomocí mapp Cockpit

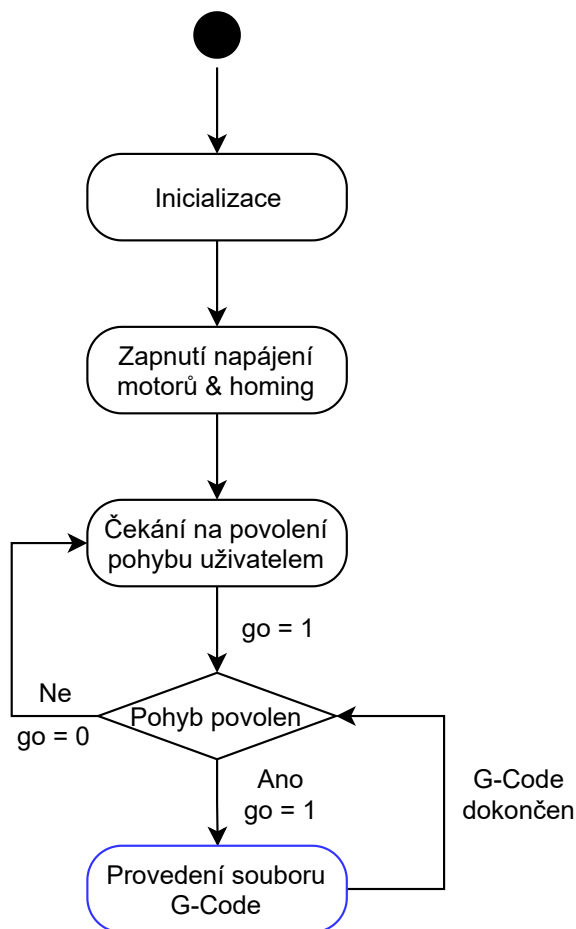
Pro testování aplikace je využito předpřipravené HMI aplikace mapp Cockpit, která vyžaduje pouze přidání jednoho souboru do složky mappCockpit v Configuration view programu Automation studio a zvolení správné verze mapp View a mapp Cockpit v okně pro změnu runtime verzí. Jakmile je do procesoru nahrán program, je možné přistoupit ve webovém prohlížeči na adresu HMI aplikace, odkud je možné ovládat veškeré funkce jednotlivých os a skupiny os bez nutnosti programování. Funkcemi je myšleno zapnutí os, nastavení nulového bodu, správa chybových hlášek a jejich resetu, provádění různých druhů pohybů, vykonávání bloků G-code a spousty dalších. Dále rozhraní umožňuje monitorovat a ukládat data os, měnění jejich konfigurace bez nutnosti restartu procesoru a její permanentní uložení. Aplikace je velmi užitečná pro ladění chyb v konfiguraci díky vestavěnému informačnímu oknu, které v případě jakékoli chyby oznámí o jakou chybu jde a jaké má identifikační číslo, pomocí kterého pak lze hledat příčinu. Vzhled aplikace je na obrázku č.42.



Obrázek 42: Vzhled webové aplikace mapp Cockpit

6.3.4 Finální program

Výsledný program je psán v jazyce C s použitím inicializační, cyklické a konečné fáze programu. Předem jsou však vloženy tři knihovny, jedna pro práci s datovými proměnnými typu string, druhá implementuje základní mechanismy programu Automation Studio a díky třetí je možné využít vyčítání času v programu. Použit je také pohybový program robotu, který je psán v jazyce G-Code a je v souboru, který je volán v cyklické části. Stavový diagram programu je na obrázku č.43.



Obrázek 43: Stavový diagram finální aplikace mapp Motion

Jak již bylo zmíněno, tak první částí programu je inicializační, kde se propojí vytvořená instance funkčního bloku s skupinou os pomocí MpLink parametru. MpLink propojuje mapp komponenty, bez něj systém nemůže fungovat. Následně je funkční blok zapnut a je navázána struktura robotických parametrů na jeden z jeho vstupů. Override je parametr, který je nastaven dále, slouží k regulaci rychlosti v jakékoli fázi pohybu, zde však k pohybu nedochází, ale nastavuje se limit rychlosti, bez kterého by se osy následně nehýbaly. Dále se nakopíruje ručně vložený text string názvu pohybového programu do struktury RoboParameters, což ulehčí následnou práci

při ladění programu, jelikož není zapotřebí do paměti vždy zapisovat název programu, taktéž pak ve finální aplikaci nemusí být v průběhu cyklické části vkládán název do této struktury. McMoveBlock je volání funkčního bloku sloužící k pohybování robotem pouze o manuálně vložený blok v jazyce G-Code, toto opět slouží hlavně pro ladění programu. Blok G-Code, který je použit pro ladění je nakopírován na vstup tohoto bloku pomocí funkce strcpy podobně jako při vkládání názvu programu. Ukázka jazyku G-Code pro pohyb robotu je ve výpisu č.1.

```
G100 G90 Q1=0 Q2=0 Q3=0
G100 G90 Q1=0 Q2=50 Q3=30
G100 G90 Q1=-40 Q2=50 Q3=30
G100 G90 Q1=0 Q2=95 Q3=-40
G100 G90 Q1=0 Q2=107 Q3=-40
G100 G90 Q1=0 Q2=95 Q3=-40
G100 G90 Q1=20 Q2=95 Q3=-60
G100 G90 Q1=20 Q2=95 Q3=-100
G100 G90 Q1=0 Q2=0 Q3=0
```

```
N999 M30
```

Výpis 1: Ukázka jazyku G-Code pro pohyb robotu

Cyklická část obsahuje nejdříve volání funkčního bloku skupiny os a funkčního bloku pro pohyb G-Code příkazem. Hlavní část však tvoří switch, který má pouze tři stavy. První stav zapíná napájení motorů a provede přímé nalezení nulového bodu, druhá stav kontroluje, zdali se může program spustit, což je informace od uživatele. Pokud je změněna logická úroveň 1 proměnné go, spustí se program pohybu, o kterém bude psáno níže. Kontrola dokončení pohybu os probíhá ve třetím stavu, který program vrací opět na předchozí stav, aby bylo možné pohyb provádět v cyklech.

Konečná fáze programu pouze dodržuje doporučení spojená s používáním propojení MpLink. Oba použité funkční bloky zde jsou vypnuty, což zamezí případné chybě komunikace mezi programem a mapp Motion komponentou.

Pohybový program je volán v cyklické části pomocí jeho názvu, poté se hned spustí. Programováno je pomocí jazyku B&R G-Code, což je upravená verze běžně používaného jazyku pro CNC stroje. Úpravy spočívají v přidání několika G funkcí, která je použita například hned na prvním řádku kódu. Snahou programu je dosáhnout stejné trajektorie pohybu jako v předchozích dvou způsobech řízení, což není možné pomocí interpolovaného lineárního interpolovaného pohybu, ale musí být provádět interpolovaný pohyb v úhlech os, k čemuž slouží právě funkce G155 udávající, že následující pohyby jsou prováděny v souřadnicovém systému os. Následuje pak 9 po sobě jdoucích poloh zakončených funkcí M30 ukončující program. Testován byl i lineární interpolovaný pohyb pro ověření funkčnosti a to pomocí funkce G01, která fungovala bez problému.

7 Realizace měření vybraných ukazatelů jakosti řízení pohybu

Tato kapitola postupně rozebírá měření opakovatelnosti polohy, změny akcelerace při pohybu, dobu cyklu pohybu a oteplení stojících i pohybujících se motorů. Zmíněné parametry byly vybrány pro měření jakosti každého ze tří způsobů řízení pro jednotnou aplikaci robotického paletizéru. Snahou je držet se doporučení daných normou ČSN EN ISO 9283 pro měření jakosti průmyslových robotů, o které je psáno v kapitole č.4. Měření jsou přizpůsobena požadavku na porovnání tří způsobů řízení mezi sebou s dostupnými prostředky pro získání dat, jako je Arduino, ESP32 či již použitý procesor X20CP0484. Každý parametr je v kapitole popsán od sestavení měřicího řetězce, až po zobrazení naměřených dat.

7.1 Zkušební podmínky

Protože výsledky jednotlivých měření mají být mezi sebou srovnána, aby bylo možné určit, který způsob řízení obstál nejlépe, je zapotřebí stanovit jednotné podmínky pro všechna měření. V první řadě je potřeba určit upevnění robotu v prostoru a určit okolní podmínky pro měření. Dále je stanovená dráha robotu a rychlost s jakou jednotlivými body prochází. Stanovení podmínek ulehčuje analýze dat a případné opakovatelnosti měření.

7.1.1 Upevnění robotu a okolní podmínky

Váhové rozložení robotu není ideální a jeho těžiště se v průběhu pohybu velmi mění, proto byla navržena podložka, ke které je přichycen podstavec robotu. Tento způsob přichycení byl vybrán z důvodů mobility a snadného variabilního uchycení dotykového panelu pro měření opakovatelnosti. Podložka má velikost 400x500mm a je vyrobena z 3mm širokého pískovaného plexiskla. Popisky a výřezy pro panel a šrouby jsou provedeny CO_2 laserem dle vlastního návrhu v programu Inkscape. Pro větší stabilitu jsou v namáhaných místech vyrobeny nohy, které zaručují, že panel a podstava robotu jsou vždy ve stejné poloze, zároveň vyzdvihují celý systém na výšku nutnou pro bezpečné uchycení dotykového panelu. Nohy jsou vytištěny na 3D tiskárně z materiálu PLA. Před každým měřením je zkontrolováno správné utažení šroubů a červíků fixujících osy každého z motorů. Dotykový panel je uchycen vždy ve stejné pozici díky pravítka vygravírovaného vedle každé z děr. Nutná je také kontrola kabeláže, zdali se může volně pohybovat a zdali nemůže svým kroucením ovlivňovat pohyb robotu. Tření vznikající mezi podstavou a podstavcem robotu je potřeba snížit na minimum pomocí grafitového maziva, pro zajištění stejných podmínek pro každé z měření. Kompletní připravená sestava robotu pro spuštění měření je na obrázku č.44.

Požadavky na prostředí, ve kterém je robot umístěn, jsou na okolní teplotu, která by se měla pohybovat okolo pokojové teploty 23°C. Podle normy by se teplota neměla měnit o více jak 2°C, což není možné v domácích podmínkách dodržet, proto je každé měření doprovázeno konstantním záznamem okolní teploty. Měřicí obvody jsou vzdáleny od zdrojů rušení, kterým

může být například síťové vedení přívodních kabelů. Ustálení systému v tomto prostředí je zajištěno podle normy.



Obrázek 44: Sestava robotu připravená pro měření

7.1.2 Rychlost pohybu a jeho dráha

Jelikož je cílem porovnat možnosti a výkonnost jednotlivých způsobů řízení, jsou rychlosti voleny tak, aby byl pohyb proveden co možná nejrychleji a bez ztráty kroku. Problém zkušební rychlosti byl takto vyřešen, jelikož není možné zcela přesně nastavit stejnou rychlost pro všechny způsoby řízení. Například u řízení RAMP je možné pouze vypočítat žádanou rychlost, ale není možné z výstupů karty ověřit, zdali byla rychlost opravdu dosažena. Podobná situace nastává i u řízení pomocí knihovny Motorky. Řízení pomocí mapp Motion tento problém nemá, je možné pomocí funkce trace v programu Automation Studio zobrazit průběh rychlosti a následně jej i derivovat pro získání profilu akcelerace.

Dráha pohybu je sjednocena pro všechna měření, liší se pouze v počtu opakování. Zajištěn je normou stanovený požadavek na pohyb všech kloubů během pohybu. Celkem je během pohybu dosaženo 9 bodů vypsanych v tabulce č.18 bez invertované osy Q_3 . Podle normy by měla být určena krychle s nakloněnou rovinou, po které by se měl pohybovat TCP robotu. Toto není možné dodržet, jelikož jedině mapp Motion obsahuje interpolovaný pohyb, díky kterému je možné pohybovat se po přímce v prostoru. Ostatní způsoby řízení pracují s úhly os. Z tohoto důvodu byly taktéž z testování vypuštěny jakékoli parametry dráhy, kromě překmitu při změně směru, který je možné vyzorovat z měření akcelerace.

Tabulka 18: Body dráhy pohybu

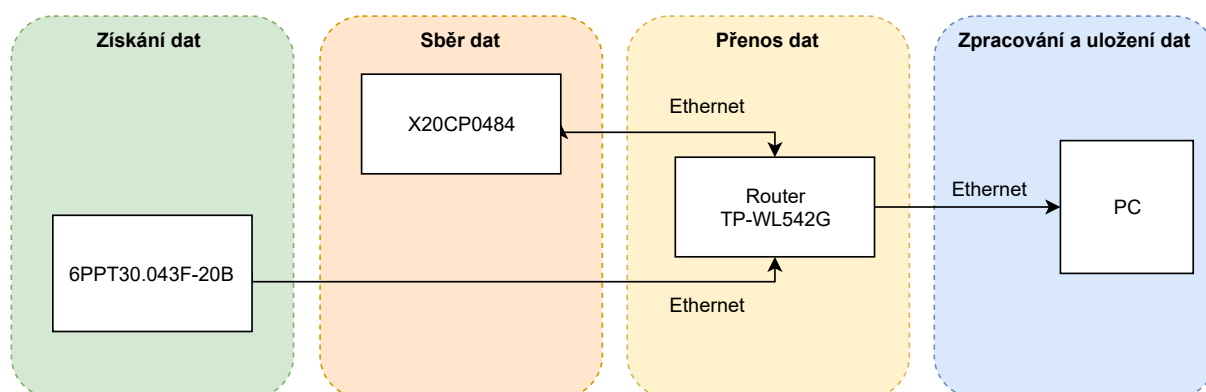
Osa	Úhel natočení (°)								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Q_1	0	0	-40	0	0	0	20	20	0
Q_2	0	50	50	95	103	95	95	95	0
Q_3	0	30	30	-40	-40	-40	-60	-100	0

7.2 Opakovatelnost polohy robotu

Toto měření spočívá v opakovaném dosažení jednoho bodu v prostoru, vždy ze stejného směru. Výsledkem je rozptyl s jakým daný způsob řízení je schopen dosáhnout žádaného bodu na obrazovce dotykového panelu při 100 opakováních. Dále je rozebrán měřicí řetězec a jeho prvky, průběh měření a data, které jsou jeho výstupem.

7.2.1 Měřicí řetězec

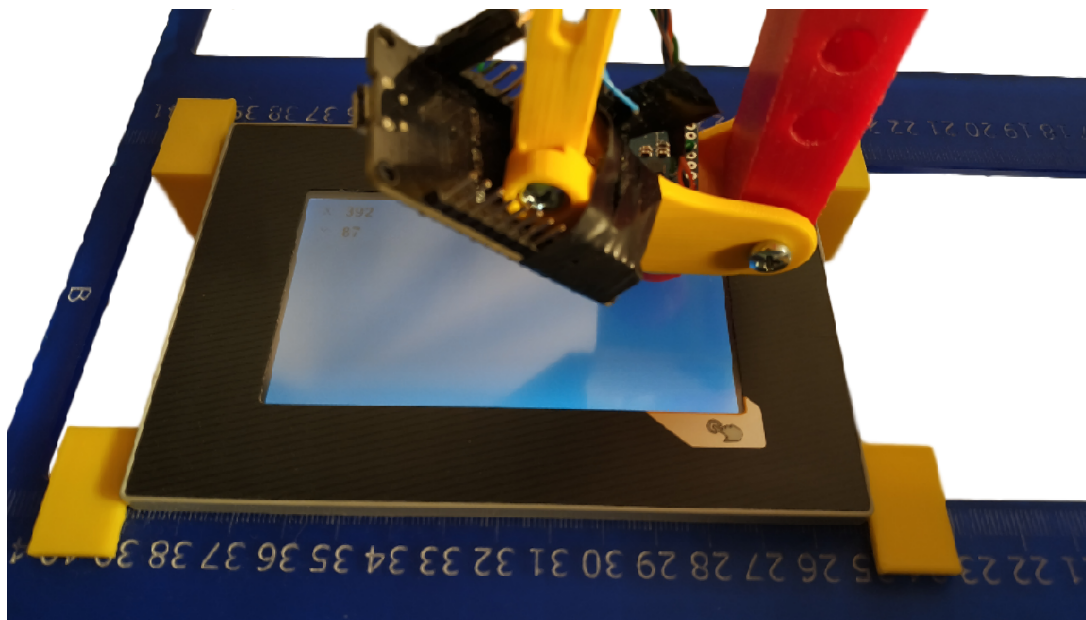
Měřicí řetězec je složen ze čtyř komponent. Senzorickou část tvoří dotykový panel předávající informaci o souřadnicích dotyku procesoru X20CP0484, který ji zpracuje a pošle pomocí PVI komunikace počítači, na kterém běží vizualizace vytvořená v programu MS Excel, zaznamenávající data pomocí vytvořených maker. V řetězci je také router, který zajišťuje vzájemné propojení všech komponent systému. Znázornění měřicího řetězce je na obrázku č.45



Obrázek 45: Měřicí řetězec opakovatelnosti měření

Senzorická část je složena z dotykového panelu 6PPT30.043F-20B sloužící v průmyslových systémech jako terminál pro vizualizaci. Panel má rozměr obrazovky 4,3" s rozlišením 480x272px. Snímání dotyku je zajištěno analogovou rezistivní vrstvou s 12-bitovým převodníkem. Panel se v systému chová jako B&R klient mapp View vizualizace, která obsahuje pouze jednu stránku, na které je umístěn paper widget, dva numerické zobrazovací prvky a popisy. Souřadnice dotyku je možné zachytávat pouze pokud je použit paper widget, což je objekt umožňující dynamické změny, je možné přes něj do vizualizace například kreslit, k čemu je nutné znát polohu dotyku uživatele. Více informací k objektu paper je možné najít ve školícím manuálu[24] k vizualizaci

mapp View. Při každém kontaktu efektoru s rezistivní vrstvou je vyvolána událost, která pošle pomocí OPC UA komunikace souřadnice do procesoru X20CP0484. Zobrazovací prvky slouží pro ověření, zdali byla procesorem přijata správná hodnota. Zachycení dotyku efektoru je viditelné na obrázku č.46. Informace byly čerpány z uživatelského manuálu[25] k dotykovému panelu.



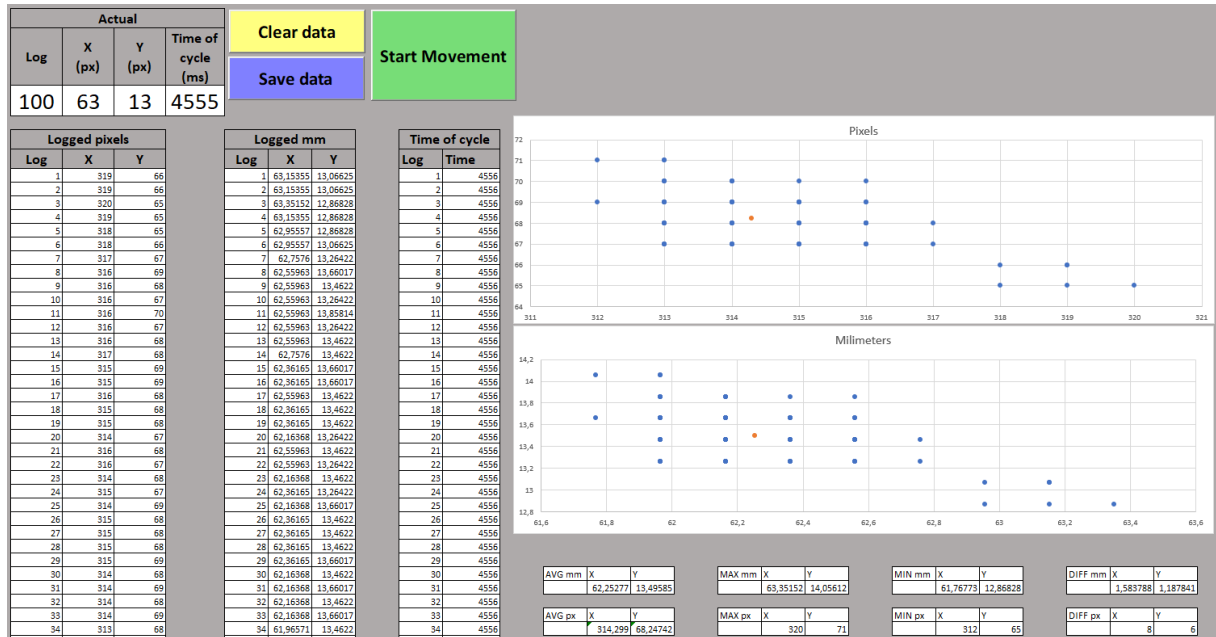
Obrázek 46: Detail dotyku efektoru na rezistivní vrstvu se zaznamenanými souřadnicemi

Sběr dat je zajištěn pomocí procesoru X20CP0484, který s dotykovým panelem v senzorické části komunikuje přes komunikaci OPC UA na sběrnici ethernet. Procesor tvoří server a dotykový panel je mu klientem. Změny, které klient provádí, jsou na serveru vyčítány každých 200ms programem nazvaným PVI, běžícím v cyklické třídě #5. Program pouze aktualizuje předešlé hodnoty globálních proměnných jejich zavoláním. Toto se provádí z důvodu komunikace s další komponentou měřicího řetězce, kterou je počítač. Ten je k procesoru také připojen přes ethernet sběrnici, na které je provozována komunikace PVI. Procesor X20CP0484 v této komunikaci opět tvoří server a počítač je klientem, který si pouze vyčítá data.

Přenos dat je mezi zařízeními vždy zajištěn sběrnici ethernet na kabelu CAT5 s konektorem RJ45. Propojení je nutné zajistit mezi třemi zařízeními, router je tedy použit z důvodu rozšíření systému o komunikační porty a možnost testování dotykového panelu přes externí dotykové zařízení připojené na IP adresu vizualizace přes WiFi.

Zpracování a uložení dat probíhá na počítači, který je klientem PVI serveru, běžícím na procesoru X20CP0484. Jako aplikace pro ukládání je zvolena aplikace MS Excel, jelikož podporuje funkci DDE klienta, tvorbu maker a je možné data ihned zobrazovat v grafech a provádět potřebné výpočty. Pro správnou funkčnost je na počítači spuštěna aplikace vytvářející DDE server, který předává datové objekty komunikace PVI svým serverům. Klient zobrazuje a zapisuje data cyklicky podle času nastaveného v konfiguračním souboru. Aplikace MS Excel provádí veškeré

úkony pomocí vytvořených maker v jazyce Visual Basic. Díky nim je možné využít aplikaci také jako vizualizační prostředek, je možné z ní robota spouštět, zastavovat, mazat data nebo je uložit do nového souboru. Data opakovatelnosti polohy jsou ukládána do sloupců a přepočítávána z pixelů na milimetry. Z těchto hodnot je pak zjištěna maximální, minimální a průměrná hodnota. Zobrazena je pak poloha dotyku v pixelech a milimetrech. Vzhled aplikace s naměřenými daty je na obrázku č.47. Více informací o komunikaci PVI je možné najít v dokumentaci[26], která je součástí instalace.



Obrázek 47: Vzhled aplikace pro sběr a ukládání dat v programu MS Excel

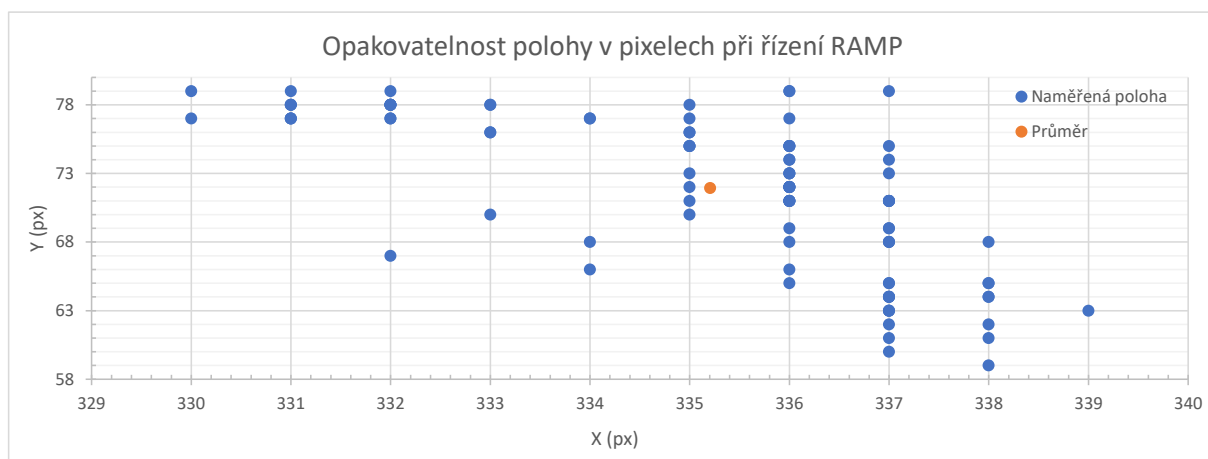
7.2.2 Naměřená data

Data byla získávána pomocí aplikace v MS Excel až po zahřátí robotu na provozní teplotu. Měření probíhalo ve 100 cyklech, přičemž při každém z nich došlo k doteku efektoru na dotykovou vrstvu panelu. Surová data jsou sbírána v pixelech a následně přepočítána na milimetry. Pro přepočet na milimetry je nejprve zjištěna hodnota DPI z úhlopříčky 4,3" a rozlišení obrazovky 480x272px podle rovnice č.1, následně je výsledek převeden z palců na milimetry pomocí rovnice č.2. Výsledná hodnota určuje jak velký je jeden pixel na obrazovce, což po vynásobení získanou hodnotou z dotykového panelu určí vzdálenost dotyku od nulového bodu obrazovky.

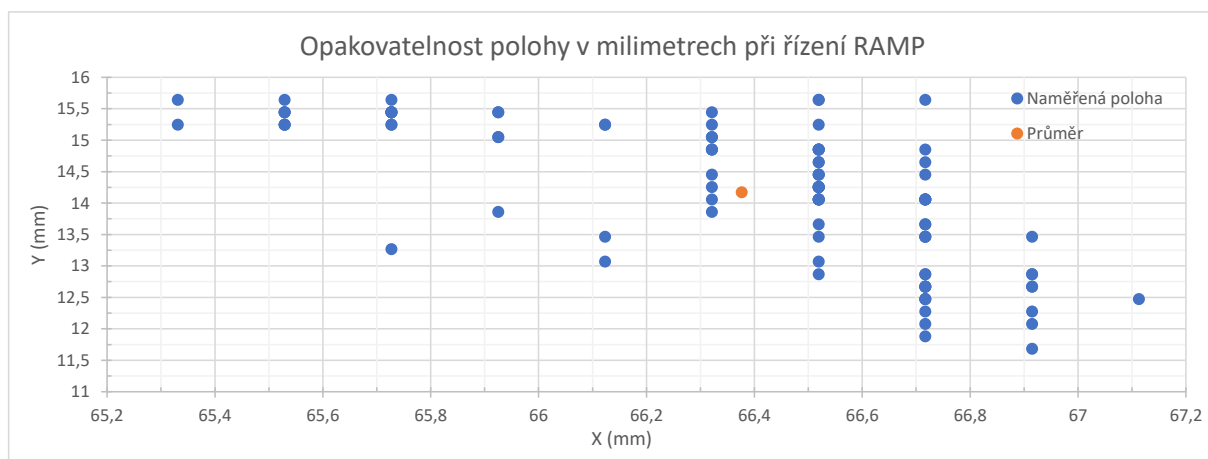
$$DPI = \frac{\sqrt{\text{délka}^2 + \text{výška}^2}}{\text{úhlopříčka}} = \frac{\sqrt{480^2 + 272^2}}{4,3} = 128,30 \text{ dpi} \quad (1)$$

$$MPPx = \frac{25,4}{DPI} = \frac{25,4}{128,30} = 0,1979735 \text{ mm} * \text{px}^{-1} \quad (2)$$

První měření probíhalo pro řízení RAMP módem, jehož výsledky jsou v grafech na obrázku č.48 a č.49. Z grafů je zřejmé, že rozdíl mezi minimální a maximální hodnotou je na ose Y 20px (3,96mm) a na ose X 9px (1,78mm) z čehož vyplývá znatelný nedostatek v přesnosti způsobené primárně osou Q_1 způsobující velkou nepřesnost na ose Y. Ze všech měření je určen kruh jehož střed je v těžišti naměřených hodnot, v grafu znázorněn oranžovou barvou na souřadnicích X 335,21px (66,38mm) a Y 71,94px (14,17mm), a průměrem daným největším rozdílem mezi maximální a minimální naměřenou hodnotou, tudíž podle osy Y je průměr 20px (3,96mm).



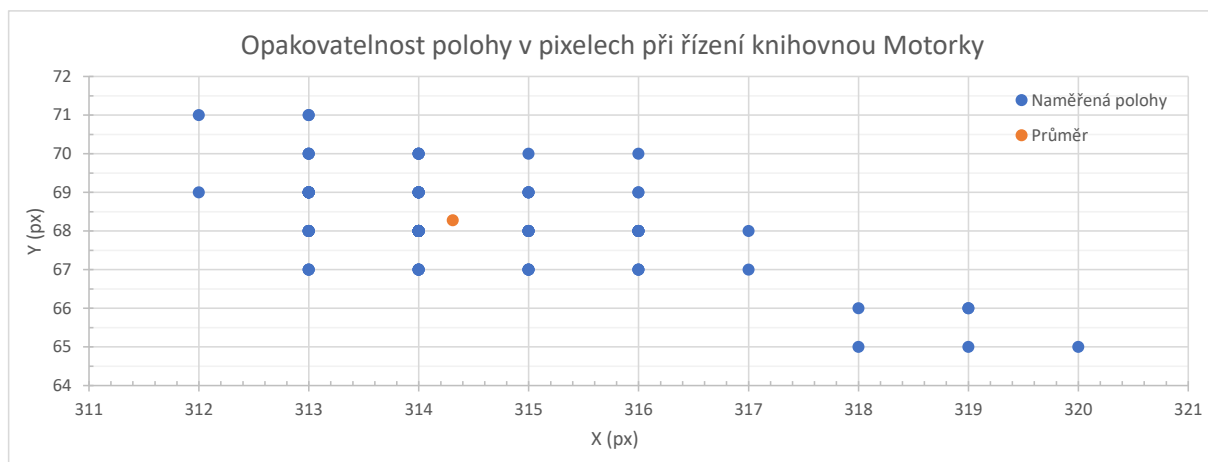
Obrázek 48: Výsledek měření opakovatelnosti polohy řízení RAMP v pixelech



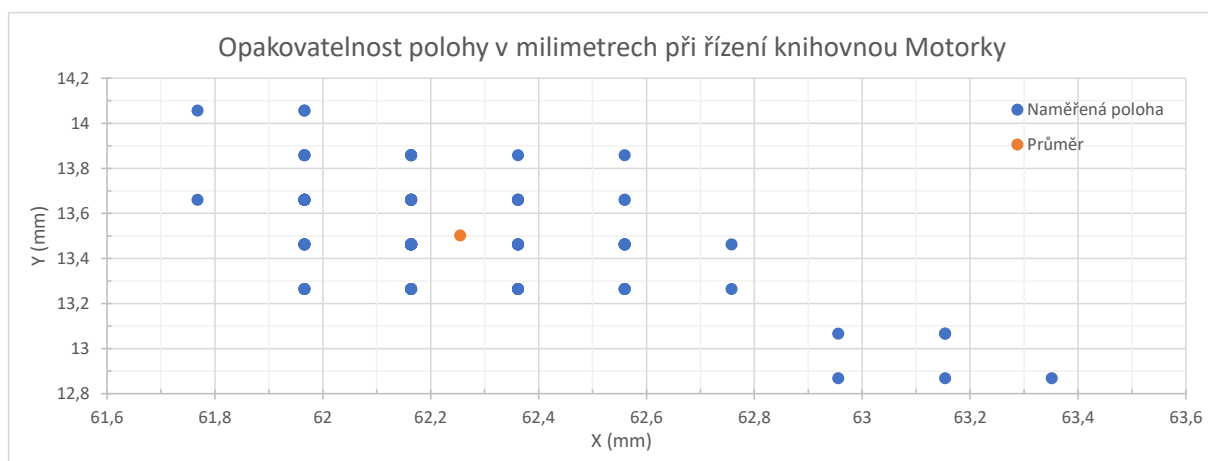
Obrázek 49: Výsledek měření opakovatelnosti polohy řízení RAMP v milimetrech

Následující měření probíhalo pro řízení knihovnou Motorky, jehož výsledky jsou v grafech na obrázku č.50 a č.51. Z grafů naměřených hodnot lze vypočítat, že rozdíl mezi minimální a maximální hodnotou je na ose X 8px (1,58mm) a na ose Y 6px (1,19mm), což značí nepřesnost způsobenou osami Q_2 a Q_3 . Opět je určena kružnice se středem v těžišti všech naměřených bodů ležící na souřadnicích X 314,31px (62,25mm) a Y 68,28px (13,50mm) znázorněném oranžovou

barvou s průměrem určeným největším rozdílem mezi minimální a maximální hodnotou, tudíž podle osy X 8px (1,58mm).

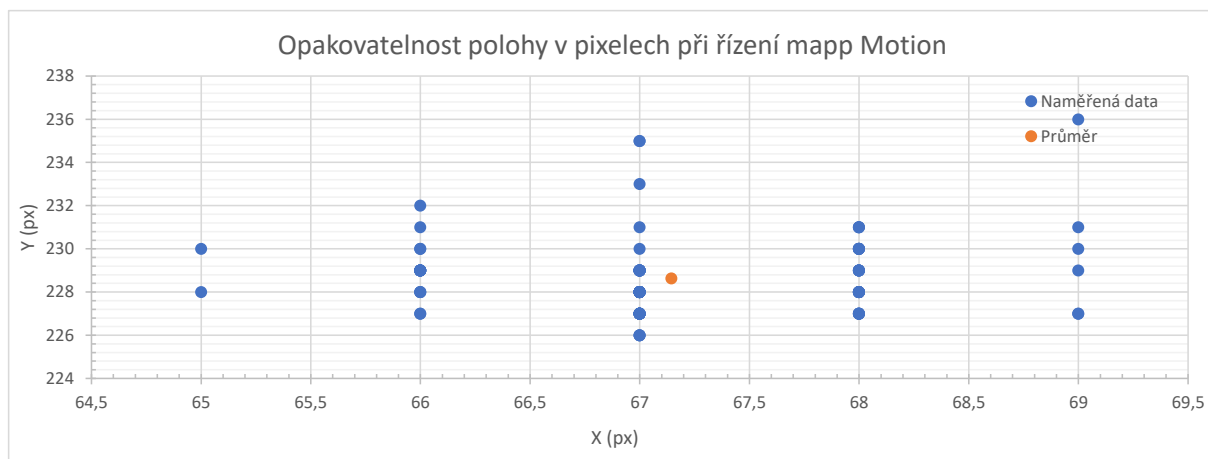


Obrázek 50: Výsledek měření opakovatelnosti polohy řízení Motorky v pixelech

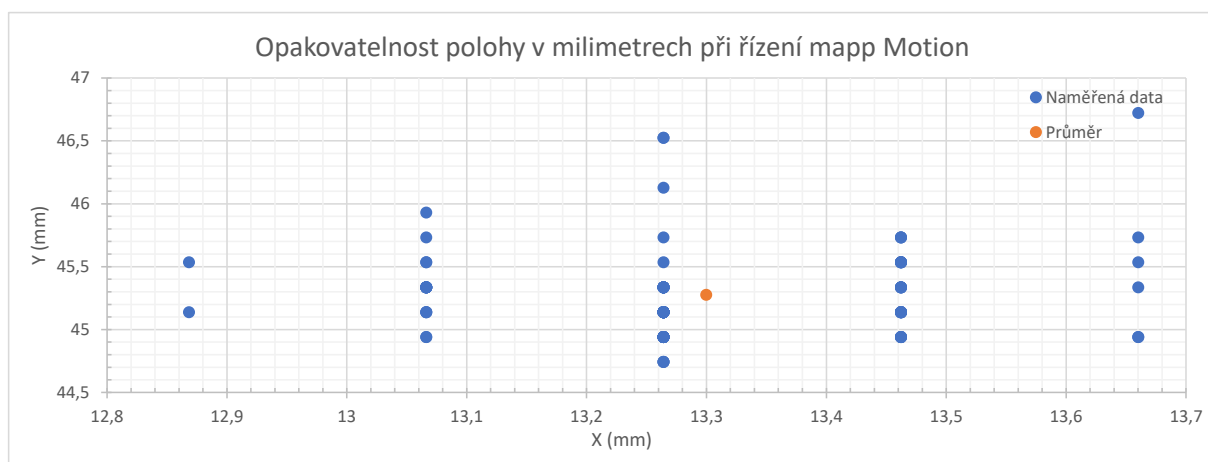


Obrázek 51: Výsledek měření opakovatelnosti polohy řízení Motorky v milimetrech

Poslední měření probíhalo pro řízení komponentou mapp Motion, jehož výsledky jsou v grafech na obrázku č.52 a č.53. Z grafů lze vyčíst že rozdíl mezi minimální a maximální naměřenou hodnotou je na ose X 4px (0,79mm) a na ose Y 10px (1,98mm), což poukazuje na nepřesnost způsobenou osou Q_1 . Kružnice, která je určena okolo naměřených hodnot, má střed v jejich těžišti na souřadnicích X 67,14px (13,3mm) a Y 228,63px (45,28mm), v grafech zobrazeno oranžovou barvou. Kolem tohoto středového bodu je kružnice s průměrem největší hodnoty rozdílu mezi minimální a maximální hodnoty, což je na ose Y 10px (1,98mm).



Obrázek 52: Výsledek měření opakovatelnosti polohy řízení mappMotion v pixelech



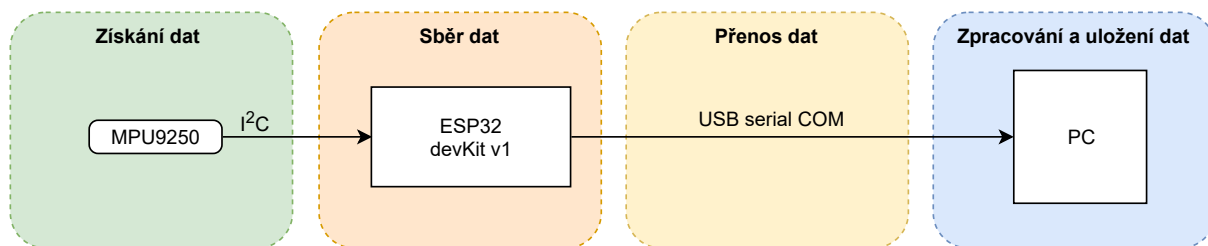
Obrázek 53: Výsledek měření opakovatelnosti polohy řízení mappMotion v milimetrech

7.3 Změna akcelerace při pohybu

Toto měření spočívá v naměření hodnot změn akcelerace v průběhu jednoho cyklu pohybu. Program robota pohybuje osami ve stejné trase jako při měření opakovatelnosti měření. Cílem je získat z akcelerometru, gyroskopu a magnetometru data při každém ze tří způsobů řízení a určit jak plynulý je pohyb efektoru robota prostorem. Dále je rozebrán měřicí řetězec spolu s jeho prvky a taktéž naměřená data.

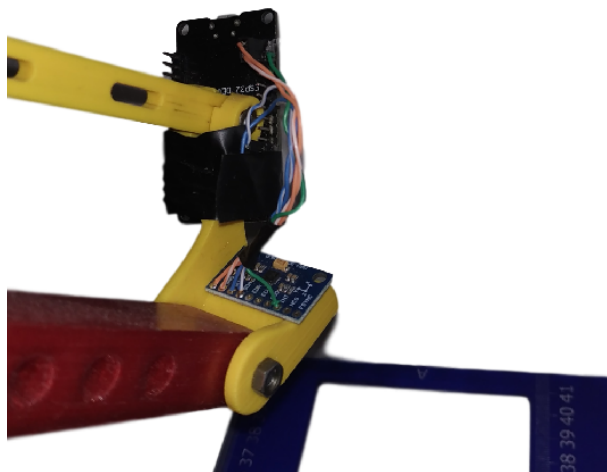
7.3.1 Měřicí řetězec

Měřicí řetězec je složen ze tří HW komponent. Senzorickou část tvoří deska plošných spojů s vícečipovým modulem MPU9250, jenž komunikuje pomocí protokolu I^2C s procesorem ESP32 usazeném na vývojové desce DevKit v1. Ten zpracovává naměřená data a přes USB posílá na komunikační port počítače data, která jsou následně uložena do aplikace MS Excel pro zpracování. Měřicí řetězec je znázorněn na obrázku č.54.



Obrázek 54: Měřící řetězec změny akcelerace při pohybu

Senzorickou část tvoří vícečipový modul MPU9250, v jehož pouzdře o velikosti 3x3x1mm je umístěn tříosý akcelerometr, gyroskop a magnetometr. Vstupní signál pro každou z os pohybu je převáděn šestnácti bitovým převodníkem, celkem tedy modul obsahuje devět převodníků z analogového na digitální signál. Komunikace je zajištěna pomocí sběrnice I^2C s frekvencí 400kHz. Modul je pro měření umístěn na vrchní části efektoru spolu s procesorem ESP32. Specifikace senzorického vícečipového modulu je čerpána z dokumentace[27].



Obrázek 55: Upevnění senzoru MPU9250 a vývojové desky DevKit v1 s procesorem ESP-32

Sběr dat je zajištěn vývojovou deskou DevKit v1 osazenou procesorem ESP32 určeném primárně pro IoT aplikace, jelikož podporuje komunikaci Bluetooth a WiFi s poměrně dobře řešeným využitím výkonu. Dvoujádrový procesor s nastavitelnou frekvencí od 80MHz do 240MHz je možné plně ovládat, případně odpojit jeho napájení pro aplikace vyžadující nízkou spotřebu. Více informací je možné se dočíst v dokumentaci[28] k procesoru ESP32. Nicméně v této aplikaci je využito SDA a SCL pinů sloužících ke komunikaci se senzorickým modulem přes protokol I^2C . Propojení je realizováno UTP vodičem s délkou 8cm, což odpovídá specifikaci protokolu, který je navrhnut primárně pro přenos dat na malé vzdálenosti. Podle dokumentace[29] je omezena pouze maximální kapacita vedení na 400pF, což obvykle odpovídá několikametrové délce vodiče. V případě přesáhnutí maximální kapacity dochází ke snížení přenosové rychlosti a ztrátě dat. Umístění senzorického a procesorového modulu na efektoru robotu je na obrázku č.55. Procesor

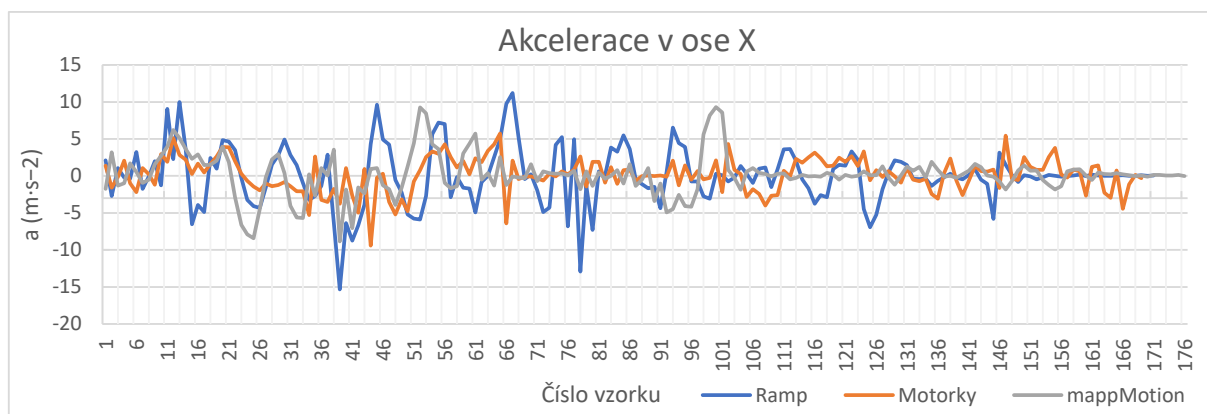
je naprogramován pomocí prostředí Arduino IDE.

Zpracování a uložení dat je zajištěno pomocí sériového komunikačního portu v počítači, který zobrazuje data podle naprogramovaného formátu spolu s časem zápisu. Formát je volen pro snadný převod dat do sloupců aplikace MS Excel.

7.3.2 Naměřená data

Data byla získávána pomocí sériového monitoru a následně ukládána do aplikace MS Excel, kde byla zpracována a zobrazena do lineárních grafů. Vzorkovací frekvence měření je přibližně 47Hz. Před měřením proběhlo důkladné zahřátí motorů a pohyb byl opakován několikrát pro ustálení mechaniky robotu.

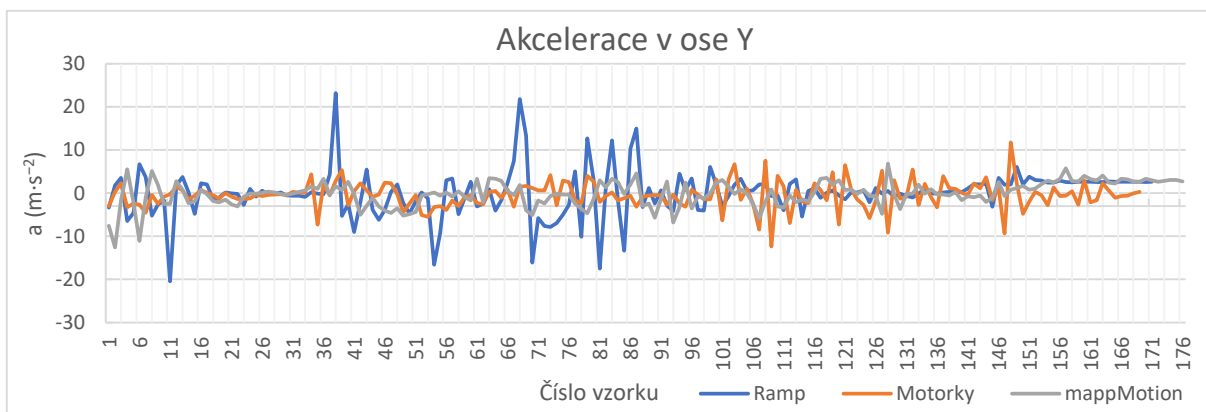
Změna akcelerace je hodnota udávána v jednotkách mm/s^2 . Naměřené grafy srovnávají vždy tři způsoby řízení pro jeden směr akcelerace, v ose X na obrázku č.56, v ose Y na obrázku č.57 a v ose Z na obrázku č.58. Ze všech tří grafů je patrné, že nejrychleji akceleruje řízení RAMP, což je u řízení bez omezení akcelerace očekávané, zároveň lze také vidět u tohoto řízení značné oscilace v každé dosaženém bodu trasy. Nejhladší průběh se projevuje při řízení pomocí SW balíku mapp Motion, jehož nárůst akcelerace je rapidní, avšak s nejhladším ustálením bez přílišných oscilací.



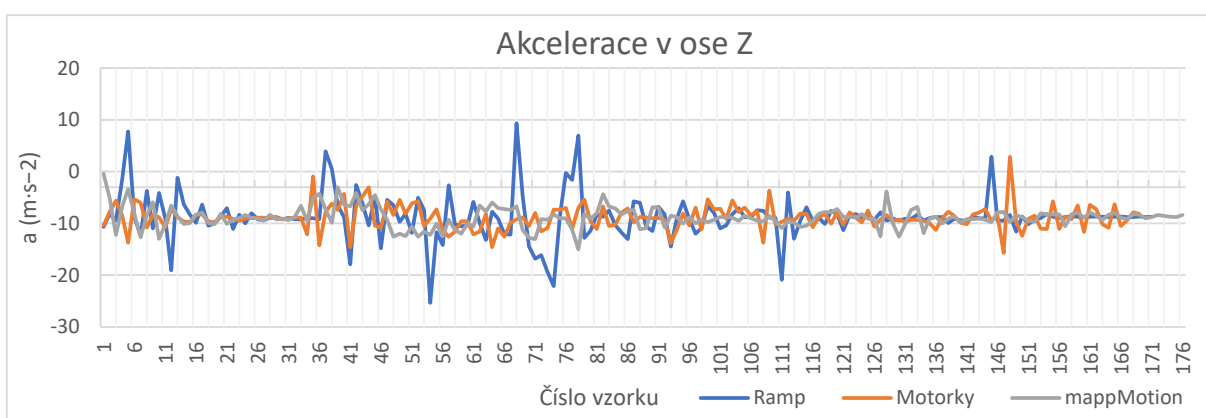
Obrázek 56: Graf akcelerace ve směru osy X

Gyroskop měří úhlovou rychlost otáčení okolo určité osy. Grafy porovnávají tři způsoby řízení mezi sebou okolo osy X na obrázku č.59, okolo osy Y na obrázku č.60 a okolo osy Z na obrázku č.61. Opět jsou patrné oscilace a natočení okolo os při řízení bez omezení akcelerace RAMP. V grafu na obrázku č.61 jsou oscilace nejvíce patrné. Zde se také jeví jako nejhladší průběh řízení s omezením akcelerace bez interpolace knihovnou Motorky.

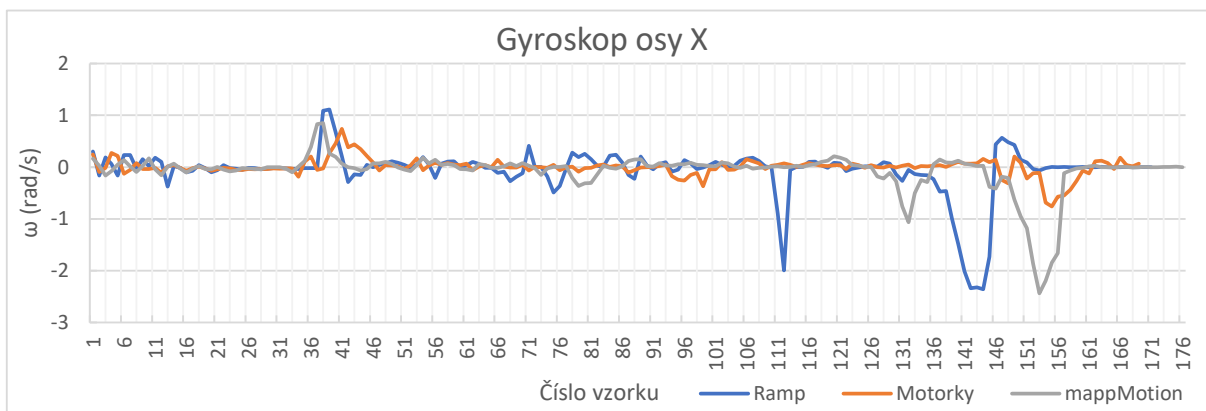
Magnetometr je senzor měřící sílu magnetického pole v jednotkách Tesla, tudíž může sloužit, například jako kompas. Ačkoli je modul MPU9250 vybaven tímto typem senzoru, jeho data jsou pro měření jakosti nepodstatná, proto zde nejsou vyobrazena. Sběr těchto dat proběhl za účelem zjištění, zdali tato veličina není taktéž ovlivněna způsobem řízení, ukázalo se však, že se grafy příliš neliší. Ukázkový graf je na obrázku č.62.



Obrázek 57: Graf akcelerace ve směru osy Y



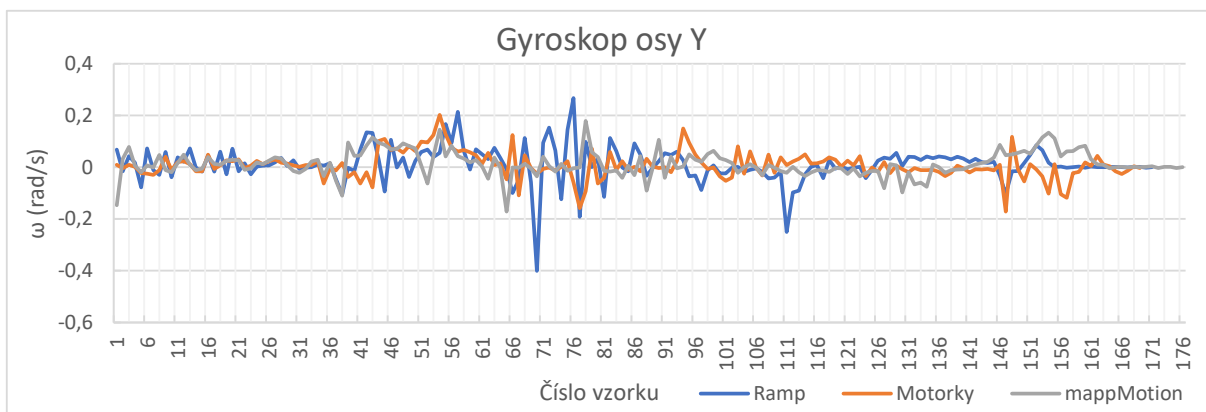
Obrázek 58: Graf akcelerace ve směru osy Z



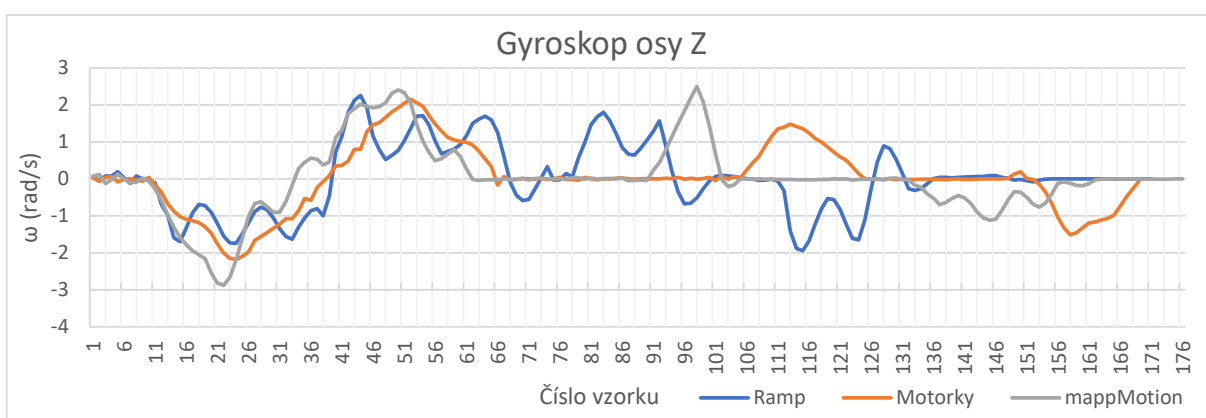
Obrázek 59: Graf úhlového zrychlení okolo osy X

7.4 Doba cyklu

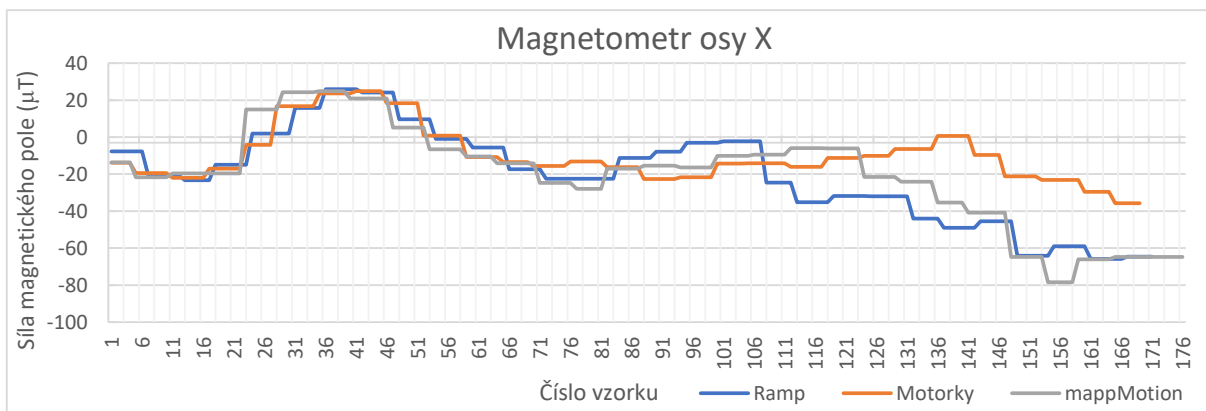
Toto měření spočívá v získání dat o trvání každého cyklu robotu při měření opakovatelnosti. Cílem je porovnat rychlost s jakou jsou jednotlivá řízení schopna projet jeden cyklus. Každé řízení



Obrázek 60: Graf úhlového zrychlení okolo osy Y



Obrázek 61: Graf úhlového zrychlení okolo osy Z

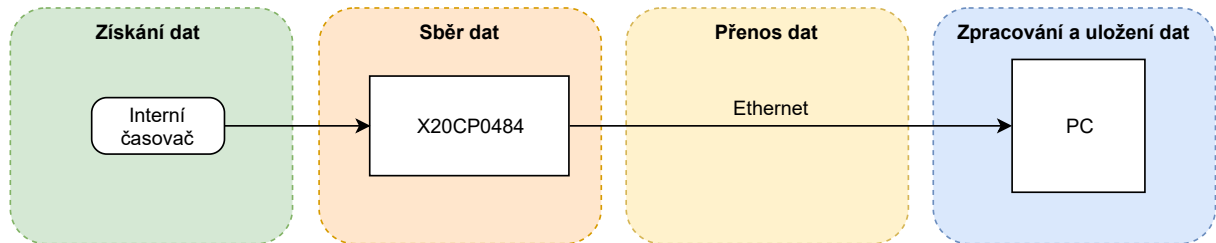


Obrázek 62: Graf úhlového zrychlení okolo osy Z

je totiž nestaveno tak, aby bylo co možná nejrychlejší, bez toho aniž by došlo ke ztrátě kroku kteréhokoliv krokového motoru. Senzorickou část zastává interní časovač procesoru X20CP0484, který data zpracovává a v milisekundách je posílá přes PVI komunikaci do počítače. Ukládání je realizováno pomocí aplikace MS Excel podobě jako při měření opakovatelnosti polohy. Dále

následuje představení měřicího řetězce a naměřených dat.

7.4.1 Měřicí řetězec



Obrázek 63: Měřicí řetězec doby cyklu

Senzorická část je tvořena interním časovačem běžícím na procesoru X20CP0484, který je vyčítán funkcí `clock_ms()` knihovny AsTime. Funkce po zavolání vrací čas v milisekundách od spuštění v datovém typu TIME, což je znaménková 32 bitová hodnota.

Sběr dat probíhá v hlavním programu pohybu, tedy v první cyklické třídě pomocí dvou proměnných datového typu TIME. Při spuštění pohybu je zavoláním funkce `clock_ms()` uložen čas startu programu do jedné z proměnných. Při dokončení jednoho cyklu pohybu je opět provedení zavolání funkce pro získání aktuálního časového údaje. Tyto dva údaje slouží k vypočtení celkového času pro provedení jednoho cyklu podle vzorce č.3. Výsledný čas cyklu je jako globální proměnná, která je volána v programu PVI běžícím v páté cyklické třídě pro obnovu dat odesílaných přes PVI komunikaci.

$$t_{cyklu} = t_{konec} - t_{start} \quad (3)$$

Zpracování a uložení dat probíhá podobně jako u opakovatelnosti pohybu. Data jsou sbírána do aplikace v MS Excel pomocí maker a je počítána průměrná hodnota času ze 100 cyklů. Znázornění měřicího řetězce je na obrázku č.63.

7.4.2 Naměřená data

Soubor naměřených dat pro každý ze způsobů řízení je zprůměrován ze 100 vzorků. Z tabulky č.19 lze vyčíst, že nejrychleji proběhl cyklus při řízení bez omezení akcelerační RAMP, ovšem s velmi nevyhovujícím profilem akcelerační, zmíněném v předchozí kapitole. Řízení s omezením akcelerační knihovnou Motorky mají nejpomalejší dobu cyklu, ovšem s velmi uspokojivými výsledky z předchozího měření akcelerační. Interpolovaný pohyb s balíkem mapp Motion je o 322ms pomalejší než řízení RAMP a je také na svém limitu proudů a rychlosti pro dosažení tohoto výsledku. Zvednutí rychlosti by vedlo ke ztrátě kroku jednoho z motorů.

Tabulka 19: Průměrná doba cyklu

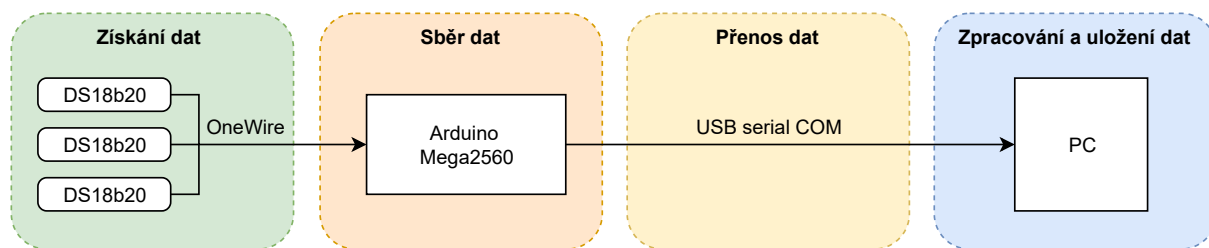
Způsob řízení	RAMP	Motorky	mapp Motion
Doba cyklu (ms)	3547,94	4556	3869,56

7.5 Oteplení motorů při zapnutém napájení

Měření oteplení motorů má za úkol porovnat schopnost efektivního využití proudů motory. Průběh tohoto měření není doprovázeno pohybem os. Cílem tohoto měření je porovnat průběhy teplot na každé z os při jednotlivých řízeních při procesu zahřívání motorů, který předchází měření opakovatelnosti polohy. Dále je rozebrán měřicí řetězec a naměřená data.

7.5.1 Měřicí řetězec

Měřicí řetězec je složen ze senzorické části tvořené čtyřmi senzory DS18B20 komunikujícími s vývojovou deskou Arduino Mega 2560 pomocí 1-Wire sběrnice. Přenos dat z procesoru do počítače je pomocí sériové linky. Schéma měřicího řetězce je na obrázku č.64.

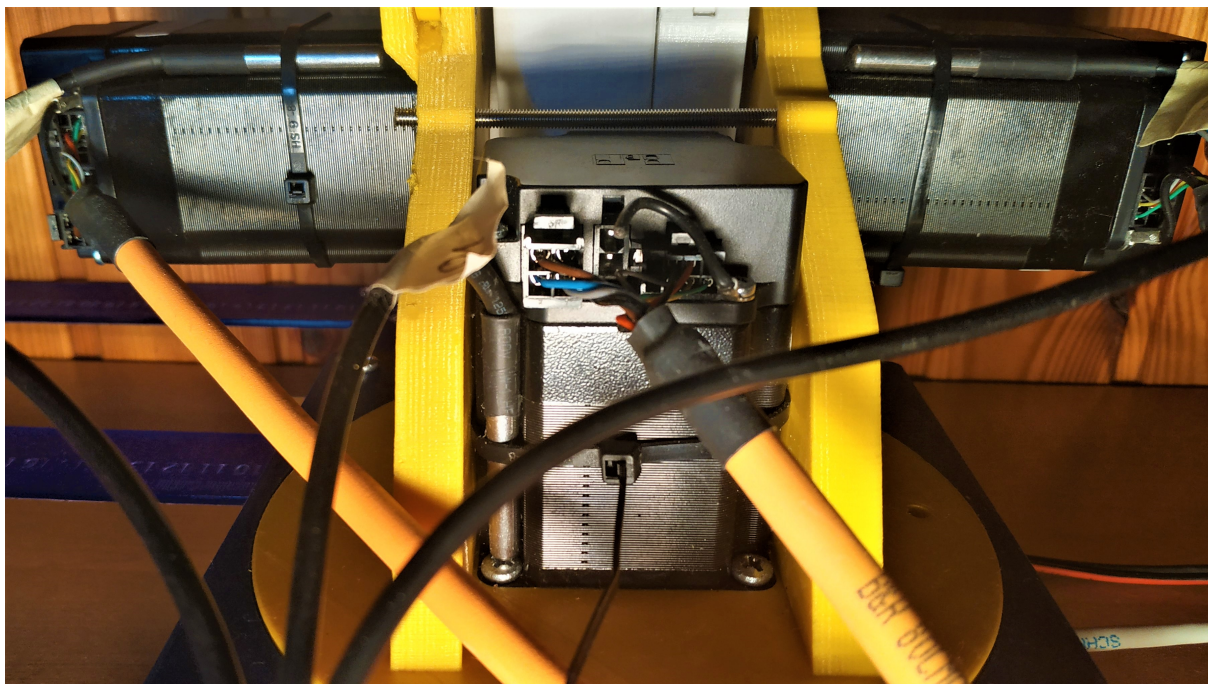


Obrázek 64: Měřicí řetězec oteplení motorů

Senzorickou část tvoří čtyři senzory teploty DS18B20 v kovovém pouzdře, tři umístěné na jednotlivých krokových motorech a jeden pro měření okolní teploty. S těmito senzory je možné měřit teplotu od -55°C do $+125^{\circ}\text{C}$ s přesností $\pm 0,5^{\circ}\text{C}$, pokud je měření v rozsahu od -10°C do $+85^{\circ}\text{C}$. Výhodou tohoto senzoru je podpora komunikace pomocí 1-Wire protokolu, který používá pouze jeden vodič pro přenos dat při master-slave konfiguraci. Informace byly čerpány z dokumentace[30] k senzoru DS18B20 a manuálu[31] ke komunikaci 1-Wire. Umístění senzorů je na krokových motorech zajištěno stahovacími páskami okolo motorů. Usazeny jsou v místě, kde je největší styčná plocha s kovovým pouzdem pro zajištění co nejlepší tepelné výměny. Detail usazení je na obrázku č.65.

Sběr dat je zajištěn 8 bitovým AVR mikroprocesorem ATmega2560 na vývojové desce Arduino Mega 2560 s frekvencí až 16MHz. Programován je pomocí prostředí ArduinoIDE. Program se stará o cyklické vyčítání dat z jednotlivých senzorů, ke kterým přistupuje pomocí jejich adresy a posílá je dále na sériový komunikační port. Informace čerpány z dokumentace[32] shrnující základní vlastnosti mikroprocesoru ATmega2560.

Uložení a zpracování dat probíhá stejně jako u měření změny akcelerace, nejprve jsou data sbírána sériovým portem a následně uložena v aplikaci MSExcel a zpracována do grafů.



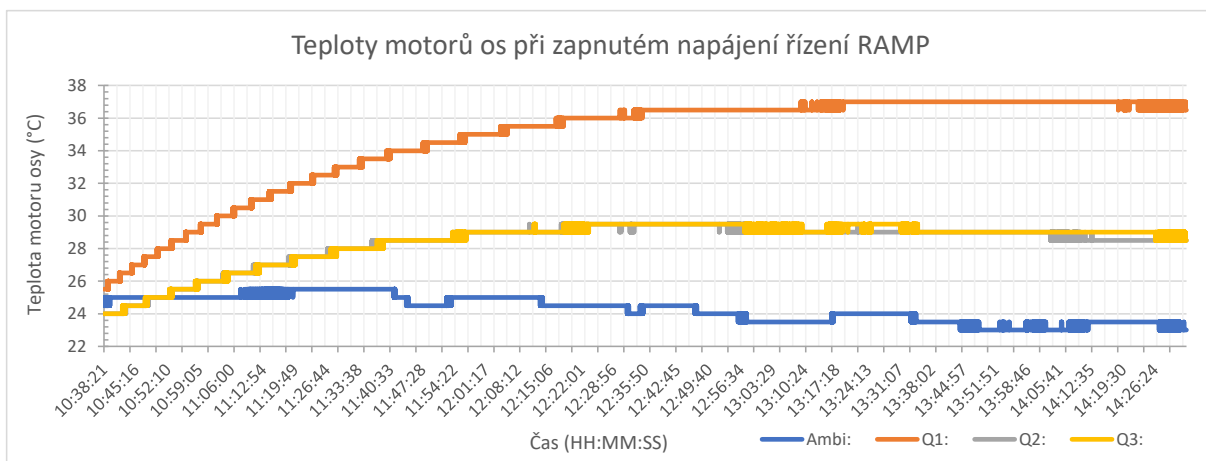
Obrázek 65: Detail uložení senzorů na krokových motorech

7.5.2 Naměřená data

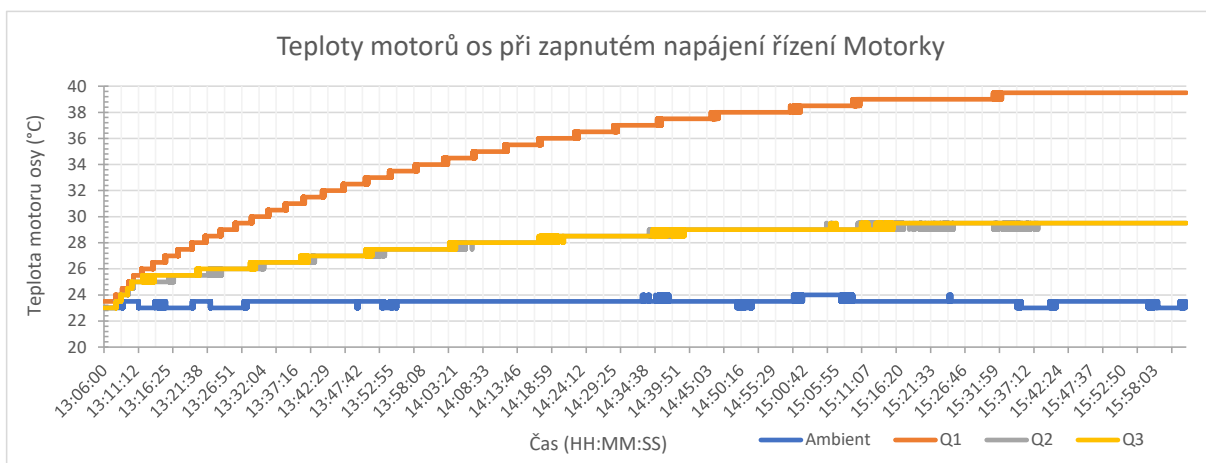
Sběr dat probíhal od spuštění motorů až po jejich úplné ustálení teploty, což trvalo od 3 do 4 hodin. Následně byla data zpracována a vykreslena do lineárních grafů. Velikost teploty se liší primárně nastavením limitů proudů, jelikož právě protékáním proudu vinutím motoru má jako nežádoucí účinek jeho oteplení. Podle dokumentace[14] je maximální provozní teplota krokového motoru 95° , této teploty během měření nebylo dosaženo. Nejvíce se vždy oteplil motor osy Q_1 , jelikož je slabší a pro jeho pohyb je potřeba, aby vinutím protékalo větší množství proudu. Osy Q_2 a Q_3 mají identické motory a nastavení proudů, proto se v grafech překrývají. Informativní hodnotou je okolní teplota, která by se dle normy[16] ČSN EN ISO 9283 neměla měnit o více jak $\pm 2^{\circ}\text{C}$, této podmínky ovšem nebylo možné dosáhnout, jelikož bylo měřeno v prostředí s velmi nestálým prouděním vzduchu. Grafy naměřených hodnot jsou na obrázku č.66 pro řízení bez omezení akceleraace, na obrázku č.67 pro řízení s omezením akceleraace knihovnou Motorky a na obrázku č.68 pro řízení s interpolací sw balíkem mapp Motion.

7.6 Oteplení motorů při pohybu

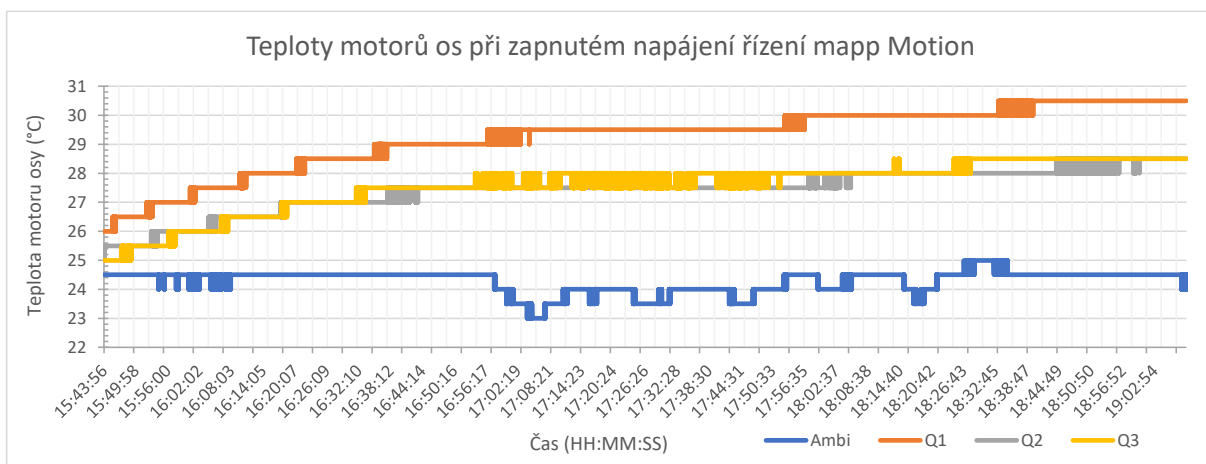
Toto měření navazuje na předešlou kapitolu č.7.5 s rozdílem, že nyní je měřeno během pohybu krokových motorů. Cílem tohoto měření je porovnat průběhy teplot každé z os při jednotlivých způsobech řízení během 100 opakování měřícího cyklu. Měřící řetězec je stejný jako při měření bez pohybu na obrázku č.64. Následuje shrnutí naměřených dat.



Obrázek 66: Graf oteplení motorů při řízení RAMP



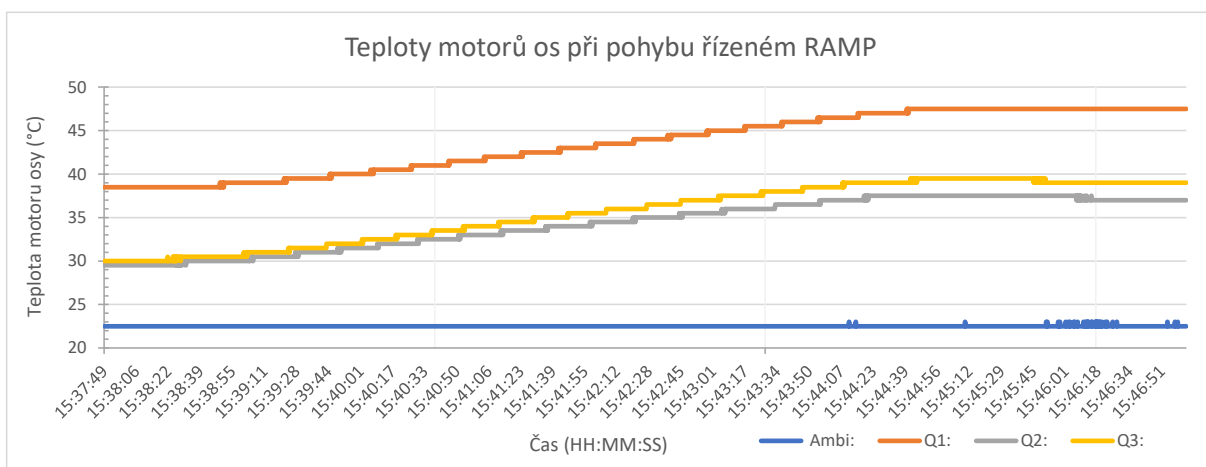
Obrázek 67: Graf oteplení motorů při řízení komponentou Motorky



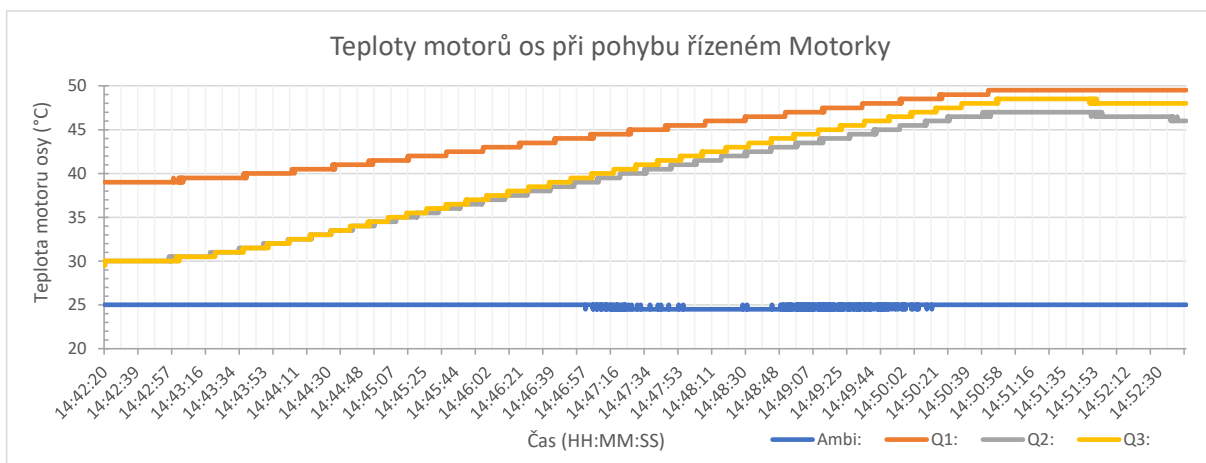
Obrázek 68: Graf oteplení motorů při řízení komponentou mapp Motion

7.6.1 Naměřená data

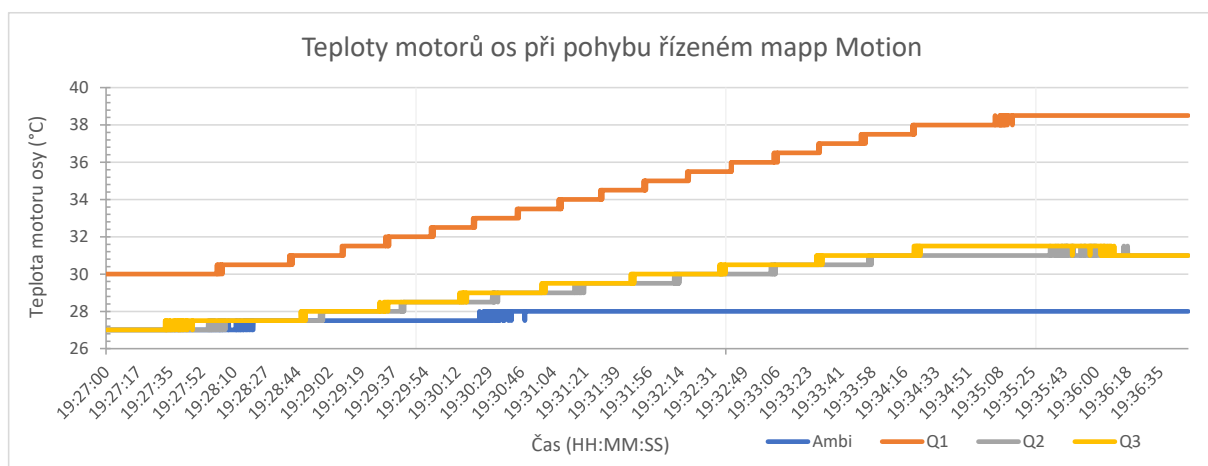
Sběr dat navazuje na předchozí měření bez pohybu motorů os, tudíž až po jejich zahřátí na provozní teplotu. Data jsou vykreslena v lineárních grafech na obrázcích č.69 pro řízení bez omezení akcelerace, č.70 pro řízení s omezením akcelerace a č.71. Teploty motorů opět nepřesáhly maximální provozní teplotu 95°C udávanou dokumentací[14], nejvíce se zahřál vždy motor osy Q_1 , kvůli jeho nastavení proudů. Výsledný průběh teplot motorů os Q_2 a Q_3 je téměř shodný, jelikož jsou použity stejné typy motorů se stejným nastavení proudů a rychlostí. Limit změny okolní teploty o $\pm 2^{\circ}\text{C}$ dán normou[16] ČSN EN ISO 9283 je při tomto měření dodržen. Největší nárůst teploty je zaznamenán při řízení knihovnou Motorky o celých 9°C , naopak nejmenší nárůst teploty nastal při řízení SW balíkem mapp Motion o $8,20^{\circ}\text{C}$.



Obrázek 69: Graf oteplení motorů při řízení RAMP



Obrázek 70: Graf oteplení motorů při řízení komponentou Motorky



Obrázek 71: Graf oteplení motorů při řízení komponentou mapp Motion

8 Zhodnocení řešení a porovnání jednotlivých metod řízení

Realizace celého robotického systému si vyžádala velké množství konzultací s firmou B&R před samotným započítím návrhu HW a SW. Čas strávený pečlivým plánováním a studováním dokumentací, norem a vědeckých článků byl v realizačních krocích velmi dobře zhodnocen. Realizace samozřejmě přinesla spousty neočekávaných chyb, ať už při návrhu HW nebo při nedostatecích SW, které byly vždy operativně vyřešeny. Celý postup byl rozdělen do několika následujících kroků.

První částí je teoretický rozbor problematiky sériových kinematik, což znamenalo nastudování několika vědeckých článků a knih. Při této části však nebylo čerpáno pouze z teoretických zdrojů, ale proběhla návštěva 61. ročníku Mezinárodního strojírenského veletrhu, kde nastudované informace dostaly tu správnou váhu. Důkladné pozorování pohybu vystavených paletizačních robotů spolu s vyslyšením názorů jednotlivých obchodních zástupců bylo velkým přínosem a promítlo se i na finální podobě práce. Zároveň bylo využito SW Scene Viewer od B&R, který umožňuje import robotu do 3D prostředí a zpřístupnění jeho os. Je tedy možné hýbat s jednotlivými osami, nebo využít interpolace pro pohyb efektoru v Kartézském systému souřadnic.

Druhá část zabývající se rozbořem a výběrem prostředků pro řízení od firmy B&R byla sestavována a konzultována právě s touto firmou. Inspirací pro tvorbu této kapitoly byla 7 měsíční stáž u firmy B&R, primárně zaměřena na vývoj SW pro řízení průmyslových tepelných řezacích CNC strojů a jejich vizualizaci. Rešerše řídicích prostředků obnášela nastudování obsáhlých uživatelských manuálů a dokumentací ke každému zmíněnému produktu v kapitole č.3. Vybraná konfigurace kompaktního systému byla několikrát konzultována s odborníky na motorové systémy ve firmě B&R a jejich názory přispěly k vylepšení systému změnou komponent. Panovaly jisté obavy o výpočetní výkon systému při řízení využívající SW balík mapp Motion, které se ovšem nepotvrdily, naopak vybraný procesor X20CP0484 překvapivě zvládl provoz nejen mapp Motion, ale také mapp View sloužící k vizualizaci, kterého bylo využito dvěma klienty. Dotykový terminál sloužící k měření opakovatelnosti byl jedním z klientů, jenž provozoval paper widget, druhým byl klient v podobě webové založené HMI aplikace mapp Cockpit.

Třetí část je věnovaná teoretickému rozboru posuzování jakosti řízení u průmyslových robotů. Jelikož literatura na toto téma není velmi rozsáhlá bylo přikročeno opět ke spolupráci s firmou B&R, jelikož jsou dceřinou firmou ABB, která má svou vlastní robotickou divizi. Díky tomuto kontaktu byly získány informace o aktuálně používaných normách pro tuto problematiku, spolu s informacemi jak tyto parametry jakosti získat. Používanou normou je ČSN EN ISO 9283, která je již zneplatněná. Vychází však z mezinárodní verze ISO 9283:1998, která je stále platná, nepředpokládá se tedy přílišná odlišnost oproti zneplatněné počestěné verzi normy. Přístup k tomuto dokumentu byl zajištěn Katedrou kybernetiky a biomedicínského inženýrství Fakulty elektrotechniky a informatiky. Tento dokument velmi přispěl k vypracování kapitoly č.4, která se touto problematikou zabývá. Obsah normy pouze popisuje a doporučuje způsob

měření jednotlivých parametrů, nezmiňuje se však o typech použitých měřících přístrojů. Tyto informace byly opět čerpány z praxe, nejčastěji formou produktových videí firem zabývajících se touto problematikou.

Čtvrtá část je čistě praktická a zabývá se návrhem a realizací modelu paletizačního robotu pomocí 3D tisku. Inspirací k této části byly informace získané při provádění rešerše sériových kinematik a hlavně SW Scene Viewer, do kterého byl importován paletizační robot Comau PAL 260. S tímto SW bylo možné pečlivě zkoumat závislosti velikostí jednotlivých částí robotu a celkovou pohybovou mechaniku. První navrženou částí byla podstava robotu, jelikož je nejsložitější a také středem propojení všech os. Návrh všech komponent začínal čistou skicou a končil finálně vytištěnou a funkční součástí robotu. V tomto procesu byl použit SW Fusion 360 pro návrh 3D objektů a následně PrusaSlic3r pro převedení STL souboru do tiskárny čitelného G-Code. Tisk všech komponent probíhal na tiskárnách Prusa i3 MK3S ve veřejně přístupné dílně FabLab. Celkem se robot skládá ze 17 komponent z nichž je celkem 14 vyrobeno pomocí 3D tisku. Zbylé 3 komponenty jsou hvězdicové vložky, které pomáhají rozložit moment motoru do tištěného materiálu. Problém, který tyto hvězdicové vložky řeší, spočívá ve velkém momentu motorů, který překoná mechanickou odolnost materiálu PETG, což vede k protočení hřídele. Snahou bylo nejdříve využít materiálu nylon-karbon, který je uváděn jako nejodolnější materiál pro FDM tiskárny. Toto řešení však neobstálo a přikročilo se ke spolupráci s firmou Vanad, kde byly na základě vytvořených modelů hvězdicové vložky vyřezány z 6mm tlusté oceli. Toto robustní řešení již splnilo očekávání, tudíž byl problém úspěšně odstraněn. Čistá tisková doba všech součástí, včetně prototypů byla 362 hodin během kterých bylo spotřebováno 747 metrů filamentu. Doba strávená řezáním hvězdicových vložek na laseru byla 6 hodin.

Pátá část je opět čistě praktická a zabývá se návrhem SW části řízení robotu. Cílem bylo vytvořit tři způsoby řízení, první pro pohyb bez omezení akcelerace, druhý s omezením akcelerace a třetí s omezením akcelerace a interpolací vzájemné polohy os. První způsob těžil z předem nabytých informací během rešerše řídicích prostředků B&R, jelikož využívá registrů na modulu X20SM1446-1, které je potřeba znát a umět s nimi pracovat tak, aby bylo možné dosáhnout kýženého výsledku. Druhý způsob vycházel z knihovny Motorky, která byla vyvinuta pobočkou B&R v Brně, tudíž bylo možné ihned konzultovat vzniklé problémy při uvádění robotu do chodu. Třetí způsob využívá SW balíku mappMotion, který od verze 5.9 podporuje řízení krokových motorů. Lze říct, že tento model robotu je prvním, na kterém je zkoušeno řízení krokových motorů pomocí mapp Motion, proto bylo poměrně obtížné překonat některé konfigurační kroky. Vzniklé problémy byly konzultovány s oddělením vývoje mapp Motion sídlícím v Brně, které bylo schopno většinu problémů odstranit, nebo vykomunikovat podporu z rakouského sídla společnosti.

Šestá část je opět praktická a jejím cílem bylo naměřit vybrané parametry jakosti robotu. Při návrhu těchto měření bylo snahou dodržet co možná nejvíce kritéria daná normou ČSN EN ISO 9283, která ovšem porovnává průmyslové roboty mezi sebou. Kapitola č.7 však porovnává jednotlivé způsoby řízení na stejném robotu. Taktéž je zde omezení dané zadáním práce a sice,

že pouze jeden způsob řízení je interpolovaný, tudíž pouze při jediném řízení je možné vytvořit a měřit trajektorii pohybu, případně s efektem pohybovat po rovné linii. Zbylé dva způsoby řízení jsou tedy omezeny na pohyb v úhlech jednotlivých os, takzvaném ACS. Již před započítáním návrhu robotu byly vymezeny dva parametry pro měření.

Prvním z nich je doba cyklu, zmíněna v kapitole č.7.4, která má za úkol vytěžit z rychlostí jednotlivých řízení maximum a tudíž zjistit, které z nich je nejrychlejší při stejném pohybovém cyklu. Výsledky měření poukazují na řízení bez omezení akcelerace, které je jednoznačně nejrychlejší ovšem s velikými protiklady danými například oscilacemi v každém dosaženém bodu polohy.

Druhý z předem určených měření byla opakovatelnost polohy, zmíněná v kapitole č.7.2. Představa o provedení měření a hlavně o senzorické části měřicího řetězce se během vývoje robotu rapidně měnila. Výsledky poukazují na nejpřesnější řízení s omezením akcelerace a interpolace vzájemné polohy os SW komponentou mapp Motion v ose X a nejpřesnější řízení s omezením akcelerace knihovnou Motorky v ose Y. Celkově nejmenší vzdálenost od těžiště naměřených bodů bylo dosaženo opět řízením s knihovnou Motorky a to s maximální odchylkou 1,58mm.

Další měřené parametry vyplynuly z vlastností, které byly zjištěny během vývoje jednotlivých řízení robotu. Například oteplení motorů bylo vybráno, jelikož rozdíl jejich teplot při pohybu byl znatelný pouhým dotekem. Měření je rozděleno na dvě části. První z nich monitoruje průběh teplot během zahřívacího procesu motoru. Z tohoto měření je jednoznačné, že nejvíce se vždy oteplí motor osy Q_1 . U řízení knihovnou Motorky vystoupala teplota až na 39,5°C, zatímco při nejmenším oteplení na 30,5°C zaznamenaném při řízení pomocí mappMotion. Druhá část monitoruje průběh teplot os během jejich pohybu, což mělo za výsledek opět největší oteplení na ose Q_1 . Největší dosažená teplota je 49°C zaznamenaná při řízení knihovnou motorky a naopak nejnižší je 38,20°C při řízení SW balíkem mapp Motion.

Měření akcelerace vyplynulo ze značně rozkmitaného pohybu při řízení RAMP, které je okem značně odlišitelné od ostatních. Data byla zaznamenána tříosým akcelerometrem a gyroskopem. Potvrdilo se, že nejvíce rozkmitaný průběh pohybu je při řízení bez omezení akcelerace. Nejhladšího průběhu celého měřicího cyklu bylo dosaženo s řízením mapp Motion. Pohyb s omezením akcelerace knihovnou Motorky je taktéž velmi uspokojivý, ovšem je potřeba si uvědomit dobu cyklu s jakou takovýchto výsledků dosahuje, pokud by bylo možné dosáhnout stejné doby cyklu jako při řízení SW balíkem mapp Motion, byl by pohyb značně rozkmitanější.

Celkové shrnutí způsobů řízení si zaslouží i hodnocení ze strany uživatelské přívětivosti. Během vývoje řízení paletizačního robotu bylo vyzkoušeno spousty způsobů řízení, jejich úprav a zdokonalování. Nejhůře se prováděly úkony s řízením bez omezení akcelerace pomocí takzvaného RAMP módu, jelikož je potřeba mít detailní znalosti o stavech, ve kterých se řídicí modul může nacházet a umět na ně správně reagovat. Toto řízení je použitelné při řízení nezávislých os, jakmile je však potřeba osy sdružovat, případně provádět interpolaci je vše na schopnostech a času programátora, což může být do jisté míry výhodou, jelikož má programátor přesný přehled nad svým programem. Řízení s omezením akcelerace s knihovnou Motorky bylo velmi rychle im-

plementovatelné. K této knihovně existuje podrobná dokumentace a celková funkčnost je velmi překvapující, což je mimo jiné viditelné na výsledcích měření. Nevýhody se projevují jakmile je potřeba kooperovat více os najednou, jelikož v knihovně není implementováno spojování os a ani žádný způsob jejich interpolace. Vše je tedy opět na schopnostech programátora, který má velmi usnadněnou práci, jelikož nemusí rozumět programování na úrovni registrů modulů X20SM1446-1. Řízení s omezením akcelerace a interpolace vzájemné polohy os SW balíkem mapp Motion je taktéž velmi uživatelsky přívětivý. Více než programováním je potřeba se při zprovoznění zabývat konfigurováním. Postupy pro většinu případů užití jsou popsány přehledně v příslušných dokumentacích. Toto řízení umožňuje spojování os a jejich interpolaci. Plusem je ladící prostředí mapp Cockpit, které zpřijemňuje práci a zjednodušuje hledání problémů. Nevýhoda tohoto řízení je v přehlednosti. Během konfigurace je možné například nastavit invertování os na třech místech, která se navzájem nekontrolují, čímž dochází k nepřehlednosti obsáhlé konfigurace. Další nevýhodou je rozšiřitelnost, jelikož vše je přístupné pouze přes konfigurační soubory, které mohou být pro určitou aplikaci nedostatečné a nebo nemusí fungovat správně. Programátor tedy musí zadat žádost prověření a opravu chyby firmě B&R, což může být časově náročné.

Průběh návrhu robotu až po jeho úspěšné oživení a naměření parametrů jakostí byl velkou výzvou, která skrývala spousty problémů, které bylo potřeba vyřešit. Naučené dovednosti byly zhodnoceny a prohloubeny ještě více na 5. ročníku akce Smrat Green Island Makeathon na Kanárských ostrovech, kde byly využity pro programování SCARA robotu sestaveného z 3D tisku, poháněného krokovými motory a řízeným komponenty firmy B&R.

Potenciál do budoucna plynoucí z této diplomové práce je veliký. Tento paletizační robot poháněn krokovými motory je vůbec první, který je řízen SW balíkem mapp Motion firmy B&R. Tímto se otevírají možnosti pro snížení nákladů na průmyslové roboty pro aplikace, které nevyžadují vysokou odolnost robotického systému. Díky technologii 3D tisku je možnost mechaniku robotu pro specifické aplikace upravovat. Je plánován také další vývoj paletizačního robotu sestaveného v této práci, jelikož je potřeba upravit mechaniku, rozložení váhy, snížení tření a spousty dalších parametrů které mohou být pro budoucí aplikace klíčové.

Literatura

1. KHALIL, W; DOMBRE, E (ed.). Front Matter. In: *Modeling, Identification and Control of Robots*. Oxford: Butterworth-Heinemann, 2002. ISBN 978-1-903996-66-9. Dostupné z DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-1-903996-66-9.50030-0>.
2. *IRB 660 datasheet* [online] [cit. 2020-01-12]. Dostupné z: <https://search-ext.abb.com/library/Download.aspx?DocumentID=9AKK107046A8172&LanguageCode=en&DocumentPartId=&Action=Launch>.
3. *Mnipulace s břemeny* [online] [cit. 2020-01-12]. Dostupné z: <https://www.bozpinfo.cz/manipulace-s-breмены>.
4. KUCUK, Serdar; BINGUL, Zafer. *Robot kinematics: Forward and inverse kinematics*. IN-TECH Open Access Publisher, 2006.
5. ANGELES, J. *Fundamentals of Robotic Mechanical Systems: Theory, Methods, and Algorithms*. Springer International Publishing, 2013. Mechanical Engineering Series. ISBN 9783319018515. Dostupné také z: <https://books.google.cz/books?id=MPW3BAAAQBAJ>.
6. *Kinematika manipulátorů* [online] [cit. 2020-01-25]. Dostupné z: http://home.zcu.cz/~msvejda/_publications/2011/1_kinematikaManipulatoru.pdf.
7. PANDILOV, Zoran; DUKOVSKI, Vladimir. COMPARISON OF THE CHARACTERISTICS BETWEEN SERIAL AND PARALLEL ROBOTS. *ACTA TEHNICA CORVINIENSIS – Bulletin of Engineering*. 2014.
8. *Robot technology mapp Robotics* [online] [cit. 2020-01-26]. Dostupné z: <https://www.br-automation.com/en/downloads/automation-academy/training-modules/motion-control-track-technology/mapp-motion/tm1112-robotics-technology-mapp-robotics/>.
9. *Automation Pc 910 User's Manual* [online] [cit. 2019-10-22]. Dostupné z: <https://www.br-automation.com/en/downloads/industrial-pcs-and-panels/automation-pc-910/automation-pc-910-users-manual/>.
10. *Datasheet X20(c)CPx58x* [online] [cit. 2019-12-24]. Dostupné z: <https://www.br-automation.com/en/downloads/control-and-io-systems/x20-system/cpus/x20cp3586/datasheet-x20ccpx58x/>.
11. *Datasheet X20CP04xx* [online] [cit. 2019-12-24]. Dostupné z: <https://www.br-automation.com/en/downloads/control-and-io-systems/x20-system/compact-s-cpus/x20cp0484/datasheet-x20cp04xx/>.
12. *ACOPOSmicro User's manual* [online] [cit. 2019-12-25]. Dostupné z: <https://www.br-automation.com/en/downloads/motion-control/drive-systems/acoposmicro/acoposmicro-users-manual/>.

13. *Datasheet X20SM1446* [online] [cit. 2019-12-25]. Dostupné z: <https://www.br-automation.com/en/downloads/control-and-io-systems/x20-system/motor-modules/x20sm1446-1/data-sheet-x20sm1446-1/>.
14. *Stepper motors user's manual* [online] [cit. 2019-12-25]. Dostupné z: <https://www.br-automation.com/en/downloads/motion-control/motors/stepper-motors/stepper-motors-users-manual/>.
15. *Datasheet OPS1200.1* [online] [cit. 2019-12-25]. Dostupné z: <https://www.br-automation.com/en/downloads/datasheet-0ps12001/?noredirect=1h>.
16. ČSN EN ISO 9283. *Manipulační průmyslové roboty - Technické parametry a související zkušební metody*. Praha: Český normalizační institut, 1999.
17. *M-410iC110-Flyer-EN* [online] [cit. 2019-12-29]. Dostupné z: <https://www.fanuc.eu/cz/en/robots/robot-filter-page/m-410-series/m-410ic-110>.
18. ČSN EN ISO 10218. *Roboty a robotická zařízení - Požadavky na bezpečnost průmyslových robotů*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2012.
19. *slic3r documentation* [online] [cit. 2020-02-15]. Dostupné z: <https://github.com/slic3r/Slic3r/wiki/Documentation>.
20. *Original Prusa i3 MK3s* [online] [cit. 2020-02-15]. Dostupné z: <https://shop.prusa3d.com/en/3d-printers/181-original-prusa-i3-mk3-3d-printer.html>.
21. *Technical Data Sheet Flexfill TPU 98A* [online] [cit. 2020-02-19]. Dostupné z: https://www.dropbox.com/sh/7kop0um75r0m7g1/AAAWs0Z8D7trA7UPz90ac2vTa?dl=0&preview=Technical+Data+Sheet_Flexfill+TPU+98A_26082019.pdf.
22. *Knihovna Motorky* [online] [cit. 2020-04-10]. Dostupné z: https://gitlab.com/br_support/Motorky.
23. *TM400 – Introduction to Motion Control* [online] [cit. 2020-04-01]. Dostupné z: <https://www.br-automation.com/en/downloads/automation-academy/training-modules/motion-control-track-technology/tm400-introduction-to-motion-control/>.
24. *TM671 – Creating powerful mapp View visualizations* [online] [cit. 2020-04-16]. Dostupné z: <https://www.br-automation.com/en/downloads/automation-academy/training-modules/visualization-and-operation/mapp-view/tm671-creating-powerful-mapp-view-visualizations/>.
25. *Power Panel T30 User's manual* [online] [cit. 2020-04-18]. Dostupné z: <https://www.br-automation.com/en/downloads/industrial-pcs-and-panels/power-panel-t-c-series/power-panel-t30/power-panel-t30-users-manual/>.
26. *PVI Development Setup* [online] [cit. 2020-04-18]. Dostupné z: <https://www.br-automation.com/en/downloads/#categories=Software-1344987434933/Automation+NET%2FPVI-1344987435101>.

27. *MPU-9250 Datasheet* [online] [cit. 2020-05-01]. Dostupné z: <https://invensense.tdk.com/download-pdf/mpu-9250-datasheet/>.
28. *ESP32 Series Datasheet* [online] [cit. 2020-05-01]. Dostupné z: https://www.espressif.com/sites/default/files/documentation/esp32_datasheet_en.pdf.
29. *I2C Manual* [online] [cit. 2020-05-01]. Dostupné z: <https://www.nxp.com/docs/en/application-note/AN10216.pdf>.
30. *DS18B20 Datasheet* [online] [cit. 2020-05-03]. Dostupné z: <https://datasheets.maximintegrated.com/en/ds/DS18B20.pdf>.
31. *1-Wire Communication with PIC Microcontroller* [online] [cit. 2020-05-03]. Dostupné z: <http://ww1.microchip.com/downloads/en/appnotes/01199a.pdf>.
32. *Atmel ATmega2560 summary datasheet* [online] [cit. 2020-05-03]. Dostupné z: http://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/Atmel-2549-8-bit-AVR-Microcontroller-ATmega640-1280-1281-2560-2561_Summary.pdf.

A Seznam příloh

Součástí práce jsou přílohy v elektronické podobě.

- 3D_tisk
 - Axialni_lozisko.stl
 - Efektor.stl
 - Hvezdicova_vlozka.stl
 - Podstavec.stl
 - Prenasec.stl
 - Rameno_osy_Q2.stl
 - Rameno_osy_Q3.stl
 - Stabilizacni_tyc_prenasec_zapesti.stl
 - Stabilizacni_tyc_zakladna_prenasec.stl
 - Tahlo_osy_Q3.stl
 - Uzaver_podlozky.step
 - Zakladna.stl
 - Zapesti.stl
- Namerena_data
 - Akcelerometr_Gyroskop_Magnetometr.xlsx
 - Opakovatelnost_polohy.xls
 - Otepleni_motoru.xlsx
- Programy
 - mappMotion_interpolace (složka souborů programu Automation Studio)
 - Ramp_Motorky (složka souborů programu Automation Studio)
 - Accel_gyro_magnet.ino
 - Motor_temp.ino
- Text_prace
 - Celý L^AT_EX